

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS NORMAS IEC60034-2-1 Y IEEE112  
PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE MOTORES DE INDUCCIÓN  
EN LABORATORIO**

**BORIS JAIR GALINDO RAMÍREZ**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE ENERGETICA Y MECANICA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
SANTIAGO DE CALI  
2010**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS NORMAS IEC60034-2-1 Y IEEE112  
PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE MOTORES DE INDUCCIÓN  
EN LABORATORIO**

**BORIS JAIR GALINDO RAMÍREZ**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Eléctrico**

**Directora  
ROSAURA CASTRILLON  
Ingeniera Eléctrica**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE ENERGETICA Y MECANICA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
SANTIAGO DE CALI  
2010**

**Nota de aceptación:**

**Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar al título de Ingeniero Eléctrico**

**HENRY MAYA**

---

**Jurado**

**GABRIEL GONZALES**

---

**Jurado**

**Santiago de Cali, 28 de Mayo de 2010**

## CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	10
INTRODUCCIÓN	11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
2. OBJETIVOS	14
2.1 GENERAL	14
2.2 ESPECÍFICOS	14
3. MARCO TEÓRICO	15
3.1. IMPORTANCIA DEL RENDIMIENTO EN LOS MOTORES ELÉCTRICOS	15
3.2. PÉRDIDAS Y RENDIMIENTO EN UN MOTOR DE INDUCCIÓN	19
3.3. NORMAS INTERNACIONALES PARA LA DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO	21
3.4. MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA Y LAS PERDIDAS SEGÚN LA NORMA IEEE112-B	21
3.4.1 Descripción general de los métodos para determinar la eficiencia y pérdidas	22
3.4.1.1 Método A de la Prueba de la Eficiencia – Entrada-salida	22
3.4.1.2 Método B de la Prueba de Eficiencia – Entrada salida con segregación de pérdidas	23
3.4.1.3 Método B1 de la Prueba de la Eficiencia – Entrada – salida con segregación de pérdidas y temperatura asumida	30

3.4.1.4 Método C de la Prueba de Eficiencia – Máquinas duplicadas	31
3.4.1.5 Método E o E1 de la Prueba de Eficiencia – Medición de potencia eléctrica con segregación de pérdidas y valor asumido para la pérdida dispersa en la carga	33
3.4.1.6 Método F o F1 de la Prueba para la Eficiencia – Circuito equivalente	38
3.4.1.7 Método C/F, E/F, o E1/F1 de la Prueba de Eficiencia – Circuito equivalente calibrado con un punto de carga	39
 3.5. MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA Y LAS PERDIDAS SEGÚN LA NORMA IEC60034-2-1	 40
3.5.1 Métodos para la determinación de la eficiencia y las pérdidas según la norma IEC 60034-2-1.	40
3.5.1.1 Métodos directos	40
3.5.1.2 Determinación de eficiencia a partir de medición indirecta	42
3.5.1.3 Métodos propuestos por la norma IEC60034-2-1 para determinar las pérdidas adicionales en carga.	47
3.5.1.4 Sumatoria de pérdidas, sin ensayo en carga.	52
3.6. RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS DE LOS MÉTODOS SIMILARES	53
3.6.1 Suministro de potencia.	53
3.6.2 Método IEC 8.2.2.5.1	55
3.6.3 Método B IEEE112.	61
 4. RESULTADOS OBTENIDOS	 69
 5. HERRAMIENTA DE EXCEL PARA CALCULAR LAS PERDIDAS Y LA EFICIENCIA EN MOTORES DE INDUCCIÓN	 77
 6. INSTRUMENTACIÓN	 80

7. CONCLUSIONES	83
BIBLIOGRAFÍA	85

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Reseña de diferentes regulaciones y normas para el ahorro de energía eléctrica en los productos y maquinas eléctricas.	15
Tabla 2. Métodos para la determinación de la eficiencia y las pérdidas, según norma IEEE	21
Tabla 3. Valores asumidos para la perdida dispersa en la carga	34
Tabla 4. Registro de los valores punto de ensayo	51
Tabla 5. Suministro de potencia para las pruebas de eficiencia	54
Tabla 6. Pérdida dispersa en la carga asumida	64
Tabla 7. Cuadro comparativo entre los métodos 8.2.2.5.1 y 8.2.2.5.3 de la norma IEC60034-2-1 respecto a los métodos B y E1 de la IEEE 112	65
Tabla 8. Datos de un motor de inducción trifásico de 10kW	69
Tabla 9. Norma IEC método 8.2.2.5.1 determinación de las perdidas adicionales en carga PLL	70
Tabla 10. Norma IEC Método asignación de pérdidas PLL 8.2.2.5.3	71
Tabla 11. Norma IEEE método B entrada salida con segregación de pérdidas y medición indirecta de la perdida dispersa en la carga	72
Tabla 12. Norma IEEE método E1 medición de potencia eléctrica bajo carga con segregación de perdidas y valor asumido para la pérdida dispersa en la carga	73
Tabla 13. Instrumentación	81

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Rendimiento de los motores	18
Figura 2. Balance de pérdidas en un motor de inducción	20
Figura 3. Porcentaje de pérdidas de un motor a plena carga	20
Figura 4. Circuito equivalente	38
Figura 5. Curva obtención pérdidas adicionales en función de la potencia útil	47
Figura 6. Circuito equivalente	52
Figura 7. Curva de pérdidas por fricción y rozamiento con el aire	56
Figura 8. Curva de pérdidas residuales en función del torque al cuadrado	58
Figura 9. Curva obtención pérdidas adicionales en función de la potencia útil	59
Figura 10. Circuito de ensayo en estrella Eh	59
Figura 11. Curva de pérdidas adicionales en carga	61
Figura 12. Curva de pérdidas por fricción y rozamiento con el aire	62
Figura 13. Curva de pérdidas residuales	63
Figura 14. Curvas de pérdidas residuales.	74
Figura 15. Rendimiento según método	74
Figura 16. Distribución de pérdidas método 8.2.2.5.1	75
Figura 17. Distribución de pérdidas método 8.2.2.5.3	75
Figura 18. Distribución de pérdidas método E1	76
Figura 19. Distribución de pérdidas método B	76



Figura 20. Valor de voltaje y los datos de carga para cada punto de carga.	77
Figura 21. los datos de vacío	78
Figura 22. Las pérdidas de acuerdo al método utilizado si es de la norma IEC60034-2-1 o de la IEEE112	78
Figura 23. Graficas de comparación de rendimiento según método y de distribución de perdidas en un motor de inducción	78

## **RESUMEN**

En este trabajo se presenta la comparación de los métodos normalizados presentados en las normas IEEE112 y el IEC60034-2-1 para evaluar la eficiencia en motores de inducción. Se presenta una tabla de equivalencias entre cada uno de los métodos de ambas normas. Un primer paso para poder realizar la medición de la eficiencia es conocer a fondo las metodologías internacionales que existen. Se hará una tabla de comparación entre las dos normas y se implementará un programa en excel para determinar la eficiencia en motores de inducción.

## INTRODUCCIÓN

La eficiencia de operación de los motores es muy importante en el consumo energético de la empresa por lo tanto es importante conocer cuál es la eficiencia nominal de los motores eléctricos para luego seleccionar los de mayor eficiencia. El Ministerio de Minas y Energía desarrollo el Programa CONOCE se encuentra impulsando un proyecto de etiquetado de motores en el cual a los fabricante se exige identificar al motor con una etiqueta que le brinde al usuario la información necesaria sobre la eficiencia del motor, adicionalmente se requiere que el fabricante certifique la eficiencia de placa, evidentemente para esta certificación es necesario laboratorios acreditados. Sin embargo en Colombia solo existen laboratorios en empresas constructoras de motores como Siemens, pero en el caso de importación de motores y la certificación de los mismos se requiere un aumento de la infraestructura actual.

Se estima que los motores eléctricos consumen cerca del 60% de la energía eléctrica usada por el sector industrial. Por lo tanto, las soluciones para el ahorro de la energía en motores han recibido una atención considerable durante las últimas tres décadas debido al incremento en el costo de la energía. Preocupaciones de tipo ambiental contribuyeron en gran medida con los esfuerzos para incrementar la eficiencia del motor y la legislación de muchos países también obligó a los fabricantes a hacer cambios a lo largo de los años en sus diseños produciendo mejoras en la eficiencia del motor pasando de un nivel estándar a uno Premium.

Los motores de inducción trifásicos son los principales elementos de trabajo de la industria y han sido desarrollados a nivel mundial diferentes métodos y normas para medir y cuantificar el nivel de eficiencia con buena exactitud y confianza.

Pero con la publicación de nuevas revisiones de las normas de la IEC y la CSA y con la norma actual de la IEEE, se han promovido nuevas y diferentes aproximaciones y cálculos.

Hoy en día existen diferentes normas para determinar la eficiencia de motores de inducción trifásicos. En muchos países, la norma internacional IEC 60034-2-1 ha sido adoptada como una norma nacional. Esta norma publicada en el 2007 es una revisión de la vieja IEC 34-2 publicada en 1972 con enmiendas en 1995-1996. Esta norma que también aplica para motores CD y sincrónicos contiene varios métodos para determinar la eficiencia del motor.

La revisión del 2007 ahora incluye disposiciones para evaluar las pérdidas adicionales en la carga mediante la medición del par de torsión brindando una incertidumbre baja en la determinación de la eficiencia del motor con base en el método de sumatoria de pérdidas.

En Estados Unidos, la norma empleada es la IEEE 112 esta norma fue publicada su primera versión en 1964 con revisión en 1991, 1996 y 2004. Esta norma contiene métodos para determinar la eficiencia de motores y generadores y pruebas específicas para la evaluación velocidad-par de torsión y rotor bloqueado. Entre los métodos relacionados con la eficiencia del motor, se incluye la sumatoria de pérdidas (Método B) en forma similar a la IEC 60034-2-1. A pesar del hecho de que las normas pueden incluir diferentes métodos, un método común de sumatoria de pérdidas (también llamado entrada-salida con separación de pérdidas) puede ser usado para evaluar la eficiencia de los motores de inducción trifásicos. Entre los métodos disponibles para las pruebas de eficiencia, el método de la sumatoria de pérdidas también es reconocido por la industria como el método más práctico con mejor repetitividad y exactitud para motores en el intervalo de 1-150kW.

La eficiencia basada en este método se calcula con la siguiente ecuación:

**Ecuación 1.** 
$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Potencia de Entrada} - \text{Pérdidas totales}}{\text{Potencia de entrada}}$$

En esta ecuación, la potencia de entrada es la potencia eléctrica en kW en los terminales de entrada del motor. Las pérdidas totales incluyen 5 componentes: pérdidas en el núcleo, pérdidas por fricción y rozamiento, pérdidas en el rotor, pérdidas en el estator, y pérdidas adicionales en la carga. Los primeros cuatro tipos de pérdidas son evaluados a partir de mediciones de la potencia de entrada, voltajes, corrientes; velocidad rotacional durante las pruebas y las pérdidas adicionales en la carga restantes son obtenidas con base en diferentes métodos dependiendo de la norma que se use.

La idea principal de este trabajo de grado es realizar un estudio de comparación de los estándares más importantes para la medida de eficiencia de motores de inducción, como lo son la IEEE112 y la IEC 60034-2-1 y obtener una tabla de equivalencia para escoger el método apropiado para cada tipo de motor de acuerdo a el uso para que este destinado el motor.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La eficiencia de operación de los motores es muy importante en el consumo energético de la empresa por lo tanto es importante conocer cuál es la eficiencia nominal de los motores eléctricos para luego seleccionar los de mayor eficiencia. El Ministerio de Minas y Energía desarrollo el Programa CONOCE que en el caso de motores requiere que el fabricante certifique la eficiencia de placa, evidentemente esta eficiencia debe ser certificada por laboratorios independientes. Sin embargo en Colombia no existen laboratorios que realicen medición de eficiencia de los motores eléctricos, por un lado no se tiene la infraestructura y por otro no se conocen los métodos.

La implementación de las pruebas normalizadas para la determinación de la eficiencia en motores eléctricos de inducción requiere el conocimiento de las normas internacionales dadas por la IEC y la IEEE. Debido a la importancia que tiene la eficiencia de los motores de inducción en el consumo energético en los últimos años se ha visto un gran dinamismo en la revisión de estas normas internacionales. En el año 2004 el comité de maquinas eléctricas de la IEEE presento la última revisión de la norma IEEE112 en la que presenta siete métodos para determinar la eficiencia del motor de inducción, así mismo en el año 2007 el comité de maquinas de la IEC presento la norma IEC60034-2-1 en la que se presenta ocho métodos para determinar eficiencia.

En este trabajo se presenta la comparación de los métodos normalizados presentados en las normas IEEE112 y el IEC60034-2-1 para evaluar la eficiencia en motores de inducción. Se presenta una tabla de equivalencias entre cada uno de los métodos de ambas normas. Un primer paso para poder realizar la medición de la eficiencia es conocer a fondo las metodologías internacionales que existen. Se hará una tabla de comparación entre las dos normas y se implementara en el laboratorio de maquinas eléctricas de la Universidad Autónoma de Occidente uno de los métodos.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 GENERAL**

Realizar un análisis comparativo entre las normas **IEEE 112B** y la norma **IEEE 60034-2-1** para determinar la eficiencia de motores de inducción en el laboratorio.

### **2.2 ESPECÍFICOS**

- Analizar cada uno de los métodos de la norma IEC60034-2-1 y la norma IEEE112
- Realizar un análisis comparativo donde se presente la equivalencia entre cada uno de los métodos propuestos en ambas normas.
- Realizar una aplicación didáctica en Excel para determinar la eficiencia de motores

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1. IMPORTANCIA DEL RENDIMIENTO EN LOS MOTORES ELÉCTRICOS.

La necesidad de conservar la energía eléctrica ha acelerado los requerimientos de motores con mayores niveles de eficiencia. Actualmente se dispone de numerosas oportunidades para alcanzar estos niveles, muchas de las cuales son incentivadas por cambios en las regulaciones gubernamentales (como en Estados Unidos), programas de descuentos, estándares industriales, y rebajas en el costo de la energía. Una reseña de estas se puede ver en la tabla 1.

Debe recordarse que el hecho de incrementar la capacidad de generación de un país es un proceso lento y difícil. Sin embargo, aun si el costo de la energía es controlado, la necesidad de capacidad adicional generará obligatoriamente planes de conservación y productos más eficientes a pasos cada vez más acelerados. Esto se ha reflejado, obviamente, en el desarrollo de los motores y a través de su historia se han presentado cambios tendientes a mejorar sus eficiencias y consumos. La siguiente es una breve cronología de las actividades realizadas a través de la historia para mejorar las eficiencias de los motores:

**Tabla 1. Reseña de diferentes regulaciones y normas para el ahorro de energía eléctrica en los productos y maquinas eléctricas.**

1962 – 1963	Introducción del armazón (frame) T, con mayor nivel de temperatura pero menor eficiencia y factor de potencia.
1974	Introducción de la primera gran línea de motores con mayor eficiencia a la estándar.
1977	La NEMA (Asociación nacional de fabricantes eléctricos, por su sigla en inglés) estableció los lineamientos de los motores de alta eficiencia.
1980-1986	La crisis económica genera una reducción en los costos de producción, influyendo negativamente en la eficiencia y el factor de potencia de los motores.

Tabla 1. Continuación

1987	La NEMA establece nuevos niveles de eficiencia para los motores (NEMA MG1-12-6B)
1990	La NEMA propone nuevos estándares para productos eléctricos de alta eficiencia (NEMA MG1-12-6C)
1991	Se elabora programa de descuentos para motores de alta eficiencia en Estados Unidos.
1992	EL senado de Estados Unidos convierte en ley la NEMA MG1-12-6C: Energy Policy Act 1992.
1993	La NEMA publica nuevos estándares para motores de alta eficiencia (NEMA MG1-1993). Esta publicación reemplaza la MG1-12-6C y continua siendo ley.
1997	Entra en vigencia la Ley EPACT 1992.

Antes de llegar a la tecnología de los motores Premium o motores de alta eficiencia, se generaron programas para ahorrar energía como por ejemplo el control del encendido y apagado de motores automáticamente (evitando desperdicios), creación de elementos de control de los motores, mantenimientos minuciosos y verificación de los niveles de carga y mejoramiento de ciertos parámetros de los motores así como planes gubernamentales para la renovación de equipos.

Todos estos procedimientos aun son validos y en una empresa donde se tenga tecnología un poco vieja y no se disponga de grandes recursos para la renovación de equipos se pueden tener en cuenta y lograr excelentes resultados en cuanto ahorro y control de desperdicio de energía eléctrica. Es importante resaltar que la cantidad lograda en ahorros por el mejoramiento de la eficiencia en un solo punto, a través del tiempo, es realmente significativa y puede llegar a superar el costo original del motor.

Los motores eléctricos, en la industria y en el sector terciario, consumen gran parte de la energía eléctrica en el mundo. Son los responsables de la conversión de la energía eléctrica en energía mecánica, y pequeñas mejoras en su eficiencia



pueden generar un ahorro importante en costes de energía. He aquí algunas sugerencias:

- 1. Utilizar motores de elevado rendimiento. Para una misma potencia, puede haber diferencias en la eficiencia entre un 3% y un 8% de un motor a otro.
- 2. Seleccionar adecuadamente la potencia del motor según los requerimientos de la carga, siendo conveniente trabajar entre un 75% y un 100% de plena carga. Para índices de carga inferiores al 75%, el rendimiento del motor disminuye considerablemente.
- 3. Usar variadores de velocidad donde sea apropiado, para ajustar la velocidad y el par a los requerimientos de la carga. Es especialmente interesante su utilización para el ahorro energético en el caso de bombas y ventiladores.
- 4. Programar correctamente las operaciones de mantenimiento y reparación. Un adecuado mantenimiento ayuda a minimizar pérdidas por rozamiento y calor, consiguiendo además alargar la vida útil del motor.

El ahorro de dinero al remplazar un motor de mayor eficiencia se puede calcular usando la siguiente ecuación:

**Ecuación 2.** 
$$S = 0.746 \text{ HP } L \text{ C T } \left( \frac{100}{E_A} - \frac{100}{E_B} \right)$$

Donde:

S = Ahorro en pesos por año.

HP = Potencia de placa en HP

L = Porcentaje de carga del motor respecto a la potencia de placa.

C = Costo de energía en pesos por kWh.

T = Tiempo de funcionamiento en horas por año.

EA = Eficiencia del motor de menor eficiencia.

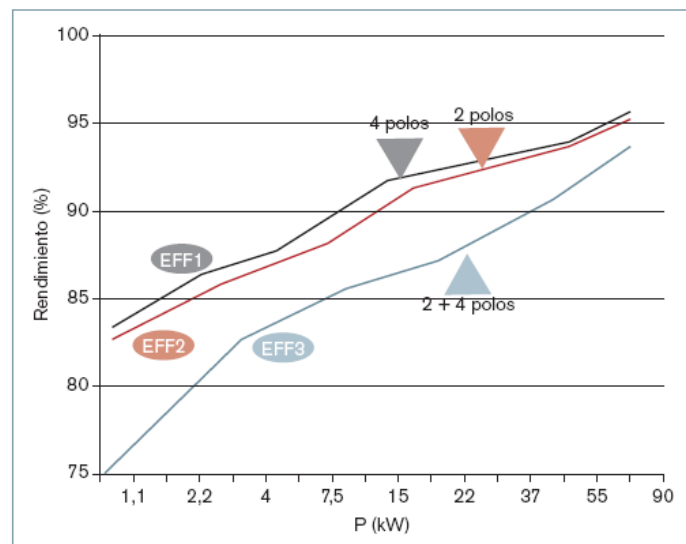
EB = Eficiencia del motor de mayor eficiencia.

Sin embargo esta ecuación no considera el costo del dinero en el tiempo, el pago de impuestos, el efecto de la inflación sobre el costo de la energía, cuestiones importantes de considerar para obtener costos más reales.

Puede observarse la importancia de conocer la eficiencia del motor para poder determinar el costo de la energía consumida por el motor y así determinar si es más rentable cambiar el motor por uno nuevo. La importancia de conocer la eficiencia real del motor y no asumir que la eficiencia es la de la placa ha hecho que existan diferentes investigaciones para determinar la eficiencia de un motor.

De acuerdo a estas medidas de ahorro y mejora del medio ambiente, diferentes países han desarrollado políticas energéticas para incentivar el uso de motores eléctricos de elevado rendimiento. En la Comunidad Europea se han establecido diferentes categorías de motores atendiendo a su rendimiento (Eff1, Eff2 y Eff3), según la figura 1.

Figura 1. Rendimiento de los motores



**Fuente:** MARTINEZ, Eusebi y TORRENT Marcel. Determinación del rendimiento en motores de inducción trifásicos según la Norma IEC 60043-2-1. En: Técnica Industrial: ingeniería y Humanidades, Julio-Agosto, 2009, No. 282 p. 38

### 3.2. PÉRDIDAS Y RENDIMIENTO EN UN MOTOR DE INDUCCIÓN

Puede decirse que el rendimiento de un motor eléctrico es la medida de la capacidad que tiene el motor para convertir la energía eléctrica en energía mecánica. En el proceso de conversión se presentan pérdidas, por lo que se determina el rendimiento de un motor a partir de:

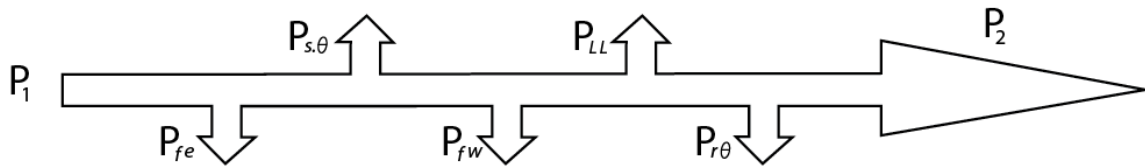
**Ecuación 3.** 
$$\eta = \frac{P_{\text{util}}}{P_{\text{absorbida}}} = 1 - \frac{\text{Pérdidas}}{P_{\text{absorbidas}}}$$

Las pérdidas que aparecen en el motor de inducción son:

- 1. Pérdidas eléctricas (pérdidas por efecto Joule): Son proporcionales al cuadrado de la corriente que circula por las bobinas y se incrementan rápidamente con la carga del motor. Aparecen como consecuencia de la resistencia eléctrica de los bobinados del estator ( $P_{j1}$ ) y de las barras conductoras del rotor ( $P_{j2}$ ).
- 2. Pérdidas magnéticas: Se producen en los núcleos de chapa magnética del estator y del rotor, debidas al ciclo de histéresis y a las corrientes de Foucault ( $P_{fe}$ ). Dependen básicamente de la frecuencia y de la inducción, por lo que prácticamente son independientes del índice de carga.
- 3. Pérdidas mecánicas: Son debidas a la fricción entre rodamientos y a las pérdidas por resistencia del aire al giro del ventilador y otros elementos rotativos del motor ( $P_{fr}$ ). Dependen de la velocidad, por lo que en el motor de inducción alimentado desde la red se consideran prácticamente constantes.
- 4. Pérdidas adicionales en carga: Estas pérdidas están relacionadas con la carga y generalmente se supone que varían con el cuadrado del par de salida ( $P_{II}$ ). La naturaleza de estas pérdidas es muy compleja influyendo, entre otros, el diseño del devanado, la relación entre la magnitud del entrehierro y la abertura de las ranuras, la relación entre el número de ranuras del estator y del rotor, la inducción en el entrehierro; las condiciones de superficie del rotor, el tipo de contacto superficial entre las barras y las laminaciones del rotor.

En la figura 2 y figura 3 se muestra un balance de pérdidas en un motor de inducción:

Figura 2. Balance de pérdidas en un motor de inducción



P1: Potencia de entrada

P2: Potencia de salida

Pse: Perdidas devanado estator

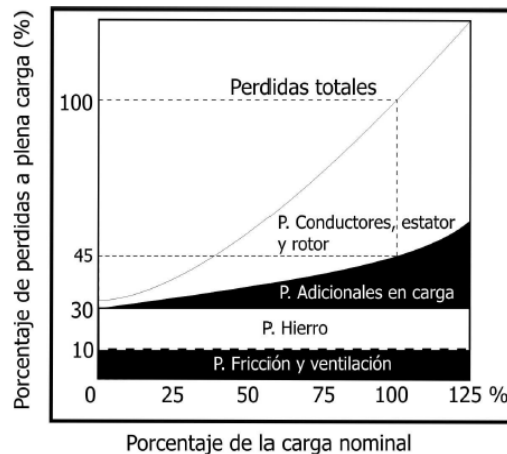
Pfw: Perdidas por fricción y ventilación con el aire

PLL: Perdidas adicionales con carga

Prr: Perdidas devanado del rotor

Pfe: Perdidas en el hierro

Figura 3. Porcentaje de pérdidas de un motor a plena carga



Fuente: CASTRILLON MENDOZA, Rosaura del Pilar y QUISPE OQUENA, Enrique Ciro. Análisis comparativo de los métodos indirectos propuesto en las Normas IEC60034-2-1 y IEEE112 para determinar la eficiencia de motores de inducción En: III Congreso Internacional sobre Uso Racional y Eficiente de la Energía (27 -30 Noviembre, 2008: Medellín). Memorias III Congreso Internacional sobre Uso Racional y Eficiente de la Energía

### **3.3. NORMAS INTERNACIONALES PARA LA DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO**

Los valores de rendimiento suministrados por el fabricante han de ser determinados de acuerdo con las normas internacionales vigentes. Tampoco existe armonización en este campo, donde podemos destacar las siguientes normas:

1. IEC 60034-2-11 (Norma Europea).
2. IEEE 1122 (Norma Americana).
3. JEC 37 (Norma japonesa).

La norma IEC 60034-2-1, editada en el año 2007, reemplaza a la IEC 60034- 2 (1996) adoptada como norma UNE. La nueva edición del año 2007 todavía no se ha adoptado como norma UNE pero probablemente se hará en breve. Esta última edición de la norma europea presenta grandes similitudes con la norma americana, principalmente en la forma de la determinación de las pérdidas adicionales en carga y en la inclusión de nuevos procedimientos para su determinación, procedimientos que no están incluidos en la edición de 1996.

### **3.4. MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA Y LAS PERDIDAS SEGÚN LA NORMA IEEE112-B**

Los diferentes métodos para la determinación de la eficiencia y las pérdidas según la norma IEEE son identificados en la tabla 2:

**Tabla 2. Métodos para la determinación de la eficiencia y las pérdidas, según norma IEEE**

Método A	Entrada – salida
Método B	Entrada – salida con segregación de pérdidas y medición indirecta de la pérdida dispersa en la carga
Método B1	Entrada – salida con segregación de pérdidas, medición indirecta de la pérdida dispersa en la carga y una temperatura asumida
Método C	Máquinas duplicadas con segregación de pérdidas y medición indirecta de la pérdida dispersa en la carga

Tabla 2. Continuación

Método E	Medición de potencia eléctrica bajo carga con segregación de pérdidas y medición directa de la pérdida dispersa en la carga
Método E1	Medición de potencia eléctrica bajo carga con segregación de pérdidas y valor asumido para la pérdida dispersa en la carga
Método F	Circuito equivalente con medición directa de la pérdida dispersa en la carga
Método F1	Circuito equivalente con valor asumido para la pérdida dispersa en la carga
Método C/F	Circuito equivalente calibrado mediante un punto de carga del método C con medición indirecta de la pérdida dispersa en la carga
Método E/F	Circuito equivalente calibrado mediante un punto de carga del Método E con medición directa de la pérdida dispersa en la carga.
Método E1/F1	Circuito equivalente calibrado mediante un punto de carga del Método E con valor asumido para la pérdida dispersa en la carga.

### 3.4.1 Descripción general de los métodos para determinar la eficiencia y pérdidas

3.4.1.1 Método A de la Prueba de la Eficiencia – Entrada-salida. Este método se limita a maquinas con potencias nominales menores a 1kW. La eficiencia se calcula como la relación de la potencia de salida medida con respecto a la potencia de entrada medida, después de las correcciones de temperatura y dinamómetro, si es aplicable.

#### • Procedimiento de la prueba

- Se mide y se registra la resistencia del devanado(s) y de la temperatura ambiente, esta prueba debe hacerse a temperatura ambiente.
- Se realiza una prueba de temperatura con carga nominal.
- Se realiza una prueba de carga con el dinamómetro o freno mecánico.
- Se realizan los cálculos de acuerdo con el formulario A y A2.
- Se realiza corrección por temperatura de la potencia y deslizamiento.
- Se calcula la eficiencia de acuerdo a los valores corregido de potencia eléctrica y mecánica

**3.4.1.2 Método B de la Prueba de Eficiencia – Entrada salida con segregación de pérdidas.** Este método es utilizado para maquinas verticales con potencias nominales entre 1kW y 300kW si la construcción de los cojinetes lo permite y para maquinas de más de 300kW.

Los datos se toman dependiendo de la región de operación para la cual se requiere la información sobre la eficiencia si está operando como motor o generador.

- **Procedimiento de la prueba:**

- **Resistencia en frio.** Con la maquina a temperatura ambiente se deben medir y registrar los valores de la resistencia del devanado y la temperatura ambiente. (Según norma IEEE 119-1974).

Se deben medir y registrar todas las combinaciones posibles T1-T2, T2-T3 y T3-T1.

- **Prueba de temperatura con carga nominal.** La maquina debe ser cargada como un motor o un generador bajo condiciones nominales.

- **Prueba bajo carga.** La maquina deberá ser cargada con un dinamómetro y debe ser realizada tan rápido como sea posible, para minimizar los cambios de temperatura durante el procedimiento de prueba.

La máquina es acoplada a una maquina de carga y es sometida a cargas en cuatro puntos de carga con aproximadamente el mismo espaciamiento entre 25% y hasta 100% de la carga y dos puntos de la carga por encima del 100% sin exceder el 150% de la carga.

En cada punto de carga se deben registrar los valores de potencia eléctrica, corriente, voltaje, frecuencia, velocidad o deslizamiento par de torsión, temperatura del devanado del estator, resistencia del devanado del estator y temperatura ambiente.

La prueba debe realizarse desde el valor de carga más alto e ir descendiendo hasta el valor de carga más bajo y si es necesario se debe hacer corrección por dinamómetro.

- **Corrección por dinamómetro.** La maquina es operada como un motor a voltaje nominal, mientras que esta acoplada al dinamómetro y toda potencia eléctrica es removida del dinamómetro.

Se deben registrar los valores de potencia eléctrica de entrada, voltaje, corriente, deslizamiento, par de torsión, resistencia y temperatura del devanado del estator, después de esto la maquina es desacoplada del dinamómetro y operada en vacio a voltaje nominal y se registran otra vez todos los valores.

La corrección por dinamómetro en Nm es determinada a partir de:

**Ecuación 4.** 
$$T_D = K_2 \frac{P_A - P_E}{n_A} - T_A$$

Donde:

**Ecuación 5.** 
$$P_A = (P_{inA} - P_{siRA} - P_h) \times (1 - S_A)$$

**Ecuación 6.** 
$$P_E = (P_{inB} - P_{siRB} - P_h)$$

$T_D$  = Corrección al par de torsión

$P_{inA}$  = Potencia de entrada en vatios (W)

$P_{siRA}$  = Perdida  $I^2R$  en el estator

$S_A$  = Deslizamiento en p.u.

$T_A$  = Par torsión en Nm

$n_A$  = Velocidad media r/m

$P_{inB}$  = Potencia de entrada en W durante prueba en vacio

$P_{siRB}$  = Perdidas  $I^2R$  en el estator en vacio (W)

$P_h$  = Perdida en el núcleo en vacio

$K_2$  = 9.549 para el par de torsión en Nm

- **Prueba en vacío.** Esta prueba se debe realizar operando la maquina como un motor a voltaje y frecuencia nominales sin carga conectada. Cuando se deben hacer separación de pérdidas se deben tomar todos los valores de temperatura,



voltaje, corriente, potencia de entrada a frecuencia nominal y con voltajes en un intervalo desde 125% del voltaje nominal e ir bajándolo hasta el punto donde una reducción adicional del voltaje incrementa la corriente.

- **Calculo de perdidas por fricción y rozamiento con el aire.** La pérdida por fricción y rozamiento con el aire puede ser determinada realizando un análisis de regresión lineal utilizando tres o más de los puntos más bajos de la potencia, contra la curva de voltaje al cuadrado.
- **Pérdida en el núcleo.** La pérdida en el núcleo,  $P_n$ , para cada voltaje de prueba se obtiene restando el valor de la pérdida por fricción y rozamiento con el aire, a la potencia en entrada menos la pérdida  $I^2R$  en el estator.
- **Pérdida  $I^2R$  en el estator.** Para una máquina trifásica  $I^2R$  en el estator,  $P_{siR}$ , en vatios es:

**Ecuación 7.**  $P_{siR} = 1.5I^2R = 3I^2R_1$

Donde:

$I$  = Corriente medida por terminal de línea, en amperios (A).

$R$  = Es la resistencia cd, en ohmios, entre dos terminales de línea cualquiera – corregida a la temperatura apropiada.

$R_1$  = Resistencia cd por fase en ohmios.

- **Pérdida  $I^2R$  en el rotor.** La pérdida  $I^2R$  en el rotor, incluyendo las pérdidas por contacto con las escobillas, se debe determinar a partir del deslizamiento de la siguiente forma:

**Ecuación 8.**

$$\left( \begin{array}{c} \text{Pérdida } I^2R \\ \text{en el rotor del motor} \end{array} \right) = \left[ \left( \begin{array}{c} \text{Potencia de entrada} \\ \text{medida en el estator} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{Pérdida } I^2R \\ \text{en el estator} \end{array} \right) - \text{Pérdida en el núcleo} \right] \times S$$

### Ecuación 9.

$$\left( \begin{array}{c} \text{Pérdida } I^2R \\ \text{en el generador} \end{array} \right) = \left[ \left( \begin{array}{c} \text{Potencia de salida} \\ \text{medida en el estator} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{Pérdida } I^2R \\ \text{en el estator} \end{array} \right) + \text{Pérdida en el núcleo} \right] \times S$$

S es el deslizamiento en p.u. con la velocidad síncrona como velocidad base

- **Pérdida aparente total.** La pérdida aparente total debe ser calculada por separado por cada punto de carga, restando la salida medida en vatios de la entrada medida en vatios
- **Determinación de la pérdida dispersa en la carga (método indirecto).** La pérdida dispersa en la carga deberá ser calculada por separado para cada punto de carga restandole a la pérdida aparente total la pérdida  $I^2R$  en el estator a la temperatura de la prueba, la pérdida en el núcleo, la pérdida por fricción y rozamiento con el aire, y la pérdida  $I^2R$  en el rotor correspondiente al valor medido del deslizamiento.
- **Aproximación de la pérdida dispersa en la carga.** Se aproximan los datos de la pérdida dispersa en la carga utilizando un análisis de regresión lineal que se basa en expresar la pérdida dispersa en la carga como una función del cuadrado del par torsión de carga.

**Ecuación 10.**  $P_{SL} = AT^2 + B$

Donde:

$P_{SL}$  = Pérdida dispersa en la carga, en vatios, como un grafico contra el par torsión al cuadrado.

T = Par de torsión en Nm.

A = Es la pendiente.

B = Intercepción con la línea de par de torsión cero.

- **Correcciones**

- Perdida dispersa en la carga corregida

**Ecuación 11.**  $P_{SLC} = AT^2$

Donde:

A = Pendiente de la curva  $P_{SL}$  contra  $T^2$ .

T = par de torsión en Nm, para cada punto de carga.

- Corrección por temperatura de la perdida  $I^2R$  en el estator.

Una perdida  $I^2R$  en el estator corregida para cada punto de carga se calcula utilizando la resistencia promedio del estator corregida para la temperatura específica así:

**Ecuación 12.**  $R_b = \frac{R_a + (t_b + K_1)}{t_a + K_1}$

Donde:

$R_a$  = Valor conocido de la resistencia del devanado, en ohmios, a una temperatura  $t_a$ .

$t_a$  = Temperatura en C° del devanado cuando se midió la resistencia  $R_a$ .

$t_b$  = Temperatura en C° para la cual debe ser corregida la resistencia.

$R_b$  = Resistencia del devanado, en ohms, corregida para la temperatura  $t_b$

$K_1$  = Es 234.5 para el 100% de conductividad en el cobre IACS, o 225 para el aluminio, para una conductividad del 62%.

- Corrección por temperatura de la perdida  $I^2R$  en el rotor.

Una perdida  $I^2R$  en el rotor corregida para cada uno de los puntos de carga se calcula de la siguiente forma:

### Ecuación 13.

$$- \left( \text{Pérdida } I^2R \text{ en el rotor del motor} \right) = \left[ \left( \text{Potencia de entrada medida en el estator} \right) - \left( \text{Pérdida } I^2R \text{ en el estator} \right) - \text{Pérdida en el núcleo} \right] \times S$$

### Ecuación 14.

$$- \left( \text{Pérdida } I^2R \text{ en el generador} \right) = \left[ \left( \text{Potencia de salida medida en el estator} \right) + \left( \text{Pérdida } I^2R \text{ en el estator} \right) + \text{Pérdida en el núcleo} \right] \times S$$

S es el deslizamiento en p.u. con la velocidad síncrona como velocidad base

El deslizamiento en p.u. está directamente relacionado con la resistencia del rotor, de esta forma, el deslizamiento puede ser corregido por temperatura utilizando la misma relación básica que existe para resistencia y temperatura, donde:

**Ecuación 15.** 
$$S_s = \frac{S_t + (t_s + K_1)}{t_s + K_1}$$

Donde:

$S_s$  = Deslizamiento en p.u. corregido para la temperatura de estator especificada  $t_s$ .

$S_t$  = Deslizamiento en p.u medido a la temperatura del devanado del estator  $t_t$ .

$t_s$  = Temperatura especificada para cada corrección de resistencia en C°

$t_t$  = Temperatura observada en el devanado del estator durante la prueba de carga en C°

$K_1$  = Es 234.5 para el 100% de conductividad en el cobre IACS, o 225 para el aluminio, para una conductividad del 62%.

- Potencia total corregida. La pérdida total corregida para cada uno de los puntos de carga es determinada como la suma de la perdida por fricción y rozamiento con el aire, la perdida en el núcleo, la perdida dispersa en la carga corregida, la perdida  $I^2R$  en el estator corregida y la pérdida  $I^2R$  en el rotor corregida.

- Potencia mecánica corregida. La potencia mecánica corregida para cada uno de los puntos de carga para un motor es igual a la diferencia entre la potencia eléctrica medida y la pérdida total corregida. La potencia mecánica corregida para un generador es igual a la suma de la potencia eléctrica medida y la potencia total corregida.

- Eficiencia. Se utiliza la potencia eléctrica medida y la potencia mecánica corregida para calcular la eficiencia así:

Para motores es:

**Ecuación 16.** 
$$Eficiencia = \frac{\text{potencia de entrada} - \text{pérdidas}}{\text{potencia de entrada}}$$

Para generadores es:

**Ecuación 17.** 
$$Eficiencia = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{potencia de salida} + \text{pérdidas}}$$

- Factor de potencia. El factor de potencia debe ser determinado para cada punto de carga utilizando la siguiente ecuación:

Obtenido indirectamente

**Ecuación 18.** 
$$fp = \frac{P}{\sqrt{3} \times VI}$$

Donde:

P = potencia eléctrica de la maquina en W, entrada para un motor o salida para generador

fp = Factor de potencia de la maquina.

V = Voltaje entrada línea a línea en voltios

I = Corriente de entrada en amperios

Obtenido directamente

**Ecuación 19.**

$$\eta_p = \frac{100}{1 + 2 \left( \frac{R_1 - R_2}{P_1 + P_2} \right)^2}$$

Donde:

$P_1$  = Lectura más alta.

$P_2$  = Lectura más baja.

**3.4.1.3 Método B1 de la Prueba de la Eficiencia – Entrada – salida con segregación de pérdidas y temperatura asumida.** Este método es utilizado para Máquinas con un valor nominal mayor que 300 kW dependiendo de la capacidad de la instalación de pruebas.

Los datos se toman dependiendo de la región de operación para la cual se requiere la información sobre la eficiencia si está operando como motor o generador.

#### ➤ Procedimiento de la prueba

- Se mide y se registra la resistencia del devanado(s) y de la temperatura ambiente.
- No se realiza prueba de carga para determinar el incremento de temperatura y temperatura total.
- Se realiza prueba en vacío.
- Se realiza una prueba bajo carga con un dinamómetro y la temperatura del estator debe estar alrededor de 10 °C de la temperatura especificada.
- Se realizan cálculos del desempeño del motor o generador de acuerdo a los formularios B1 y B1-2.
- Se calculan las pérdidas por fricción y rozamiento con el aire.
- Se calculan las pérdidas en el núcleo.

- Se calculan las pérdidas por  $I^2R$  en el estator.
- Se calculan las pérdidas por  $I^2R$  en el rotor.
- Se calcula la pérdida total aparente.
- Se determina la pérdida dispersa en la carga (método indirecto).
- Se realiza la corrección de la pérdida dispersa en la carga.
- Se realiza la corrección por temperatura de la pérdida por  $I^2R$  en el estator para cada uno de los puntos de carga con la resistencia promedio en frío del estator.
- Se realiza la corrección por temperatura de la pérdida por  $I^2R$  en el rotor utilizando el valor del deslizamiento para cada uno de los puntos corregidos a la temperatura específica.
- Se calcula la pérdida total corregida para cada uno de los puntos de carga.
- Se realiza potencia mecánica corregida.
- Se calcula la eficiencia de la máquina utilizando la potencia eléctrica corregida y la potencia mecánica corregida.
- Se debe determinar el factor de potencia de la máquina para cada punto de carga.
- Se realiza resumen de características de acuerdo al formulario B1.

**3.4.1.4 Método C de la Prueba de Eficiencia – Máquinas duplicadas.** Este método es utilizado para Máquinas con un valor nominal mayor que 300 kW dependiendo de la capacidad de la instalación de pruebas.

Y puede ser utilizado cuando hay máquinas duplicadas. Las dos máquinas se acoplan juntas y se conectan eléctricamente a dos fuentes de potencia, la frecuencia de una es ajustable.

Por conveniencia en la descripción de este análisis, la máquina que está conectada al suministro de potencia con frecuencia nominal constante durante la prueba de carga es identificada como máquina M1 y la máquina conectada al voltaje variable, suministro de frecuencia variable es identificada como máquina M2.

- **Procedimiento de la prueba**

- Se miden y se registran la resistencia del devanado y temperatura ambiente de ambas maquinas.
- Se realiza pruebas de vacío para ambas maquinas.
- Se realiza prueba bajo carga acoplando las dos maquinas dejando que la máquina M1 sea alimentada desde el suministro de potencia a frecuencia nominal y que la máquina M2 opere desde el suministro de potencia variable.
- Se calcula el desempeño de la maquina utilizando los formularios C y C2.
- Se calculan perdidas por fricción y rozamiento con el aire.
- Se calculan perdidas en el núcleo.
- Se calculan perdidas por  $I^2R$  en el estator.
- Se calculan perdidas por  $I^2R$  en el rotor según utilizando las ecuaciones correspondientes si es motor o generador.
- Se calcula la perdida dispersa en la carga promediando los valores que se tienen de las maquinas M1 y M2.
- Se hace la aproximación de la perdida dispersa en la carga utilizando el análisis de regresión lineal
- Se realizan correcciones de la perdida dispersa en la carga.
- Se realiza corrección por temperatura de la pérdida  $I^2R$  en el estator.
- Se realiza corrección por temperatura de la pérdida  $I^2R$  en el rotor.
- Se calcula la pérdida total corregida.
- Se calcula la potencia mecánica total corregida.
- Se calcula la eficiencia de la maquina utilizando la potencia eléctrica corregida y la potencia mecánica corregida.
- Se debe determinar el factor de potencia de la máquina para cada punto de carga.
- Se realiza resumen de características de acuerdo al formulario C.



**3.4.1.5 Método E o E1 de la Prueba de Eficiencia – Medición de potencia eléctrica con segregación de pérdidas y valor asumido para la pérdida dispersa en la carga.** Este método se puede utilizar en máquinas verticales con potencia nominal entre 1kW y 300kW cuando la construcción de los cojinetes no permite utilizar el método B. Y para máquinas con potencia nominal de más de 300kW.

Este tipo de prueba mide la potencia de entrada y determina la potencia de salida restando las pérdidas totales de la entrada. Las pérdidas totales son iguales a la suma de las pérdidas del estator y el rotor corregidas para la temperatura especificada para corrección de la resistencia, pérdida en el núcleo, pérdida por fricción y rozamiento con el aire y pérdida dispersa en la carga

- **Procedimiento de la prueba**

- **Resistencia en frío.** Con la máquina a temperatura ambiente, se miden y se registran las resistencias del devanado y la temperatura ambiente.

- **Prueba bajo carga.** Para obtener los datos, es necesario acoplar mediante una correa o engranajes la máquina a una carga variable y sometida a cargas en cuatro puntos de carga con aproximadamente igual espaciamiento entre el 100% y el 25% de la carga y dos puntos de carga por encima del 100% pero sin exceder el 150% de la misma.

En cada punto de carga se deben registrar los valores de potencia eléctrica, corriente, voltaje, frecuencia, velocidad o deslizamiento par de torsión, temperatura del devanado del estator, resistencia del devanado del estator y temperatura ambiente.

No se requiere de una lectura del par de torsión para cada punto de carga.

- **Prueba en vacío.** Esta prueba se debe realizar operando la máquina como un motor a voltaje y frecuencia nominales sin carga conectada. Cuando se deben hacer separación de pérdidas se deben tomar todos los valores de temperatura, voltaje, corriente, potencia de entrada a frecuencia nominal y con voltajes en un intervalo desde 125% del voltaje nominal e ir bajándolo hasta el punto donde una reducción adicional del voltaje incrementa la corriente.

➤ **Prueba para la perdida dispersa en la carga.** Esta prueba se utiliza la medición directa, donde la frecuencia fundamental y los componentes de alta frecuencia de la perdida dispersa en la carga son determinados, y la suma de estos es la perdida dispersa en la carga, donde:

**Ecuación 20.**  $P_{SL} = P_{SLS} + P_{SLr}$

$P_{SLS}$  = ( $P_s$  – perdida  $I^2R$  estator) en W = Perdida dispersa en la carga a frecuencia fundamental.

$P_{SLr}$  = ( $P_r - P_m$ ) – ( $P_{rr} - P_{SLS}$  – pérdida  $I^2R$  estator) en W = Perdida a alta frecuencia.

$P_m$  = Potencia mecánica en W requerida para accionar el motor sin aplicar voltaje a los terminales del devanado del estator.

$P_r$  = Potencia mecánica en W requerida para accionar el rotor.

$P_{rr}$  = Entrada eléctrica en W al devanado del estator durante la prueba de rotación inversa.

$P_s$  = Entrada eléctrica en W al devanado del estator con rotor removido

La perdida dispersa en la carga también se puede determinar cuando no es medida de acuerdo a la tabla 3, donde se asume el valor para carga nominal.

**Tabla 3. Valores asumidos para la perdida dispersa en la carga**

Valores nominales de la maquina en kW	Porcentaje de la pérdida miscelanea en la carga de la carga nominal
1–90	1.8%
91–375	1.5%
376–1850	1.2%
1851 y mayores	0.9%

➤ **Cálculo de pérdidas por fricción y rozamiento con el aire.** La pérdida por fricción y rozamiento con el aire puede ser determinada realizando un análisis de regresión lineal utilizando tres o más de los puntos más bajos de la potencia, contra la curva de voltaje al cuadrado.

➤ **Pérdida en el núcleo.** La pérdida en el núcleo,  $P_n$ , para cada voltaje de prueba se obtiene restando el valor de la pérdida por fricción y rozamiento con el aire, a la potencia en entrada menos la pérdida  $I^2R$  en el estator.

➤ **Pérdida  $I^2R$  en el estator.** Para una máquina trifásica  $I^2R$  en el estator,  $P_{SiR}$ , en vatios es:

**Ecuación 21.**  $P_{SiR} = 1.5I^2R + 3I^2R_1$

Donde:

$I$  = Corriente medida por terminal de línea, en amperios (A).

$R$  = Es la resistencia cd, en ohmios, entre dos terminales de línea cualquiera – corregida a la temperatura apropiada.

$R_1$  = Resistencia cd por fase en ohmios.

Debe ser corregida para la temperatura del devanado especificada

➤ **Pérdida  $I^2R$  en el rotor.** La pérdida  $I^2R$  en el rotor, incluyendo las pérdidas por contacto con las escobillas, se debe determinar a partir del deslizamiento de la siguiente forma:

**Ecuación 22.**

$$\left( \begin{array}{c} \text{Pérdida } I^2R \\ \text{en el rotor del motor} \end{array} \right) = \left[ \left( \begin{array}{c} \text{Potencia de entrada} \\ \text{medida en el estator} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{Pérdida } I^2R \\ \text{en el estator} \end{array} \right) - \text{Pérdida en el núcleo} \right] \times S$$

**Ecuación 23.**

$$\left( \begin{array}{c} \text{Pérdida } I^2R \\ \text{en el generador} \end{array} \right) = \left[ \left( \begin{array}{c} \text{Potencia de salida} \\ \text{medida en el estator} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{Pérdida } I^2R \\ \text{en el estator} \end{array} \right) + \text{Pérdida en el núcleo} \right] \times S$$

$S$  es el deslizamiento en p.u. con la velocidad síncrona como velocidad base

El valor del deslizamiento deberá ser corregido para la temperatura del devanado especificada antes de realizar el cálculo.

➤ **Pérdida dispersa en la carga.** Cuando se establece la pérdida dispersa a plena carga el nivel de pérdida para cada uno de los puntos de carga es determinado por la relación entre el cuadrado de las corrientes del rotor así:

**Ecuación 24.** 
$$P_{dx} = P_{dx} \left( \frac{I_x}{I_s} \right)^2$$

El valor de la corriente de rotor para cada punto de carga a considerar es determinado con:

**Ecuación 25.** 
$$I_x = \sqrt{I^2 - I_0^2}$$

Donde:

$I$  = Valor de la corriente de línea del estator en amperios para el cual debe ser determinada la pérdida dispersa en la carga.

$I_0$  = Valor de la corriente en vacío.

➤ **Pérdidas totales y potencia de salida.** Las pérdidas totales de la máquina son la suma de las pérdidas por fricción y rozamiento con el aire, la pérdida en el núcleo, la pérdida  $I^2 R$  en el estator, la pérdida  $I^2 R$  en el rotor, y la pérdida dispersa en la carga.

La salida de potencia en el eje para un motor es igual a la entrada eléctrica al estator menos las pérdidas totales mencionadas arriba.

Para un generador, la potencia de salida es igual a la potencia de entrada eléctrica durante la prueba de carga y la potencia de entrada en el eje es igual a la entrada de potencia eléctrica más las pérdidas anteriores.

- Eficiencia. Se utiliza la potencia eléctrica medida y la potencia mecánica corregida para calcular la eficiencia así:

Para motores es:

**Ecuación 26.** 
$$Eficiencia = \frac{\text{potencia de entrada} - \text{pérdidas}}{\text{potencia de entrada}}$$

Para generadores es:

**Ecuación 27.** 
$$Eficiencia = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{potencia de salida} + \text{pérdidas}}$$

- Factor de potencia. El factor de potencia debe ser determinado para cada punto de carga utilizando la siguiente ecuación:

Obtenido indirectamente

**Ecuación 28.** 
$$fp = \frac{P}{\sqrt{3} \times VI}$$

Donde:

P = potencia eléctrica de la maquina en W, entrada para un motor o salida para generador

fp = Factor de potencia de la maquina.

V = Voltaje entrada línea a línea en voltios

I = Corriente de entrada en amperios

Obtenido directamente

**Ecuación 29.** 
$$fp = \frac{100}{\sqrt{1 + 3 \left( \frac{R_1 - R_2}{P_{L1} + R_2} \right)^2}}$$

Donde:

$P_1$  = Lectura más alta.

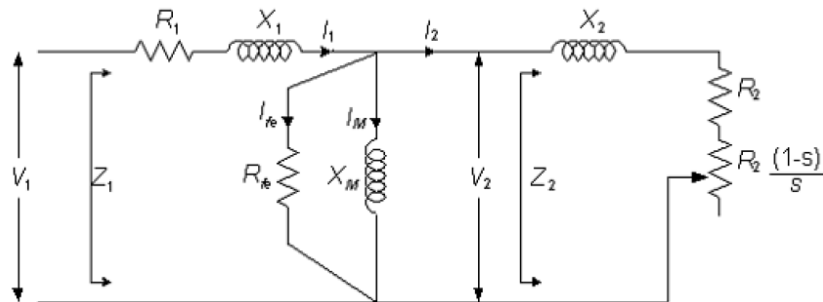
$P_2$  = Lectura más baja.

#### 3.4.1.6 Método F o F1 de la Prueba para la Eficiencia – Circuito equivalente.

Este método se puede utilizar en maquinas verticales con potencia nominal entre 1kW y 300kW cuando la construcción de los cojinetes no permite utilizar el método B. Y para maquinas con potencia nominal de más de 300kW.

Cuando no se hacen pruebas bajo carga, las características de operación son calculadas con base en el circuito equivalente, figura 4.

Figura 4. Circuito equivalente



Fuente: IEC Standard 600034-2-1, Rotating Electrical Machines. Part 2-1: Standard for determining losses and efficiency from tests excluding machines for traction vehicles. Switzerland: IEC, 2007. 80 p. IEC Standard 600034-2-1

- **Procedimiento de la prueba**

- Se miden y se registran la resistencia del devanado y temperatura ambiente de la maquina.
- Se realiza prueba en vacio.
- Se realiza prueba de impedancia.
- Se calculan las perdidas por fricción y rozamiento con el aire.

- Se calculan las pérdidas en el núcleo.
- Se determina el circuito equivalente.
- Se calcula la pérdida dispersa en la carga.
- Se realiza el método de prueba F donde se realiza una medición directa de la pérdida dispersa en la carga. La frecuencia fundamental y los componentes de alta frecuencia de la pérdida dispersa en la carga son determinados y la suma de estos dos componentes es la pérdida dispersa en la carga total.
- Se realiza el método de prueba F1 donde la pérdida dispersa en la carga es asumida cuando es la carga nominal.
- Se realizan los cálculos de acuerdo a los formularios F y F2.
- Se calcula el par de torsión máximo de acuerdo con la formula

**Ecuación 30.**

$$s = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2}}$$

**3.4.1.7 Método C/F, E/F, o E1/F1 de la Prueba de Eficiencia – Circuito equivalente calibrado con un punto de carga.** Estos métodos se pueden utilizar cuando está disponible un punto de prueba bajo carga para una temperatura de estator, y el circuito equivalente puede ser calibrado encontrando valores mejorados para  $R_2$  y  $X_M$ .

- **Procedimiento de las pruebas**

- Se deben utilizar los Formularios F y F2, e iniciar en la segunda línea con un valor asumido de  $R_2/s$  para el punto de carga de prueba y el valor de  $R_1$  basado en una temperatura del devanado del estator de. Después de llegar al cálculo de la potencia del estator, verifique los valores calculados de la corriente de entrada y la potencia de entrada contra los valores medidos de la corriente de entrada y la potencia de entrada.

- Se debe ajustar  $R_2/s$  y  $X_M$  e iterar hasta que el valor calculado de la potencia de entrada y la corriente de entrada están ambos de acuerdo con los valores medidos de corriente y potencia de entrada alrededor del 1.
- Se debe obtener  $R_2$  multiplicando el valor asumido final de  $R_2/s$  por el valor medido del deslizamiento en por unidad de la velocidad sincrónica. Este procedimiento establece el valor de  $R_2$  (sin corrección por temperatura) que será usado en el cálculo de las características de desempeño de la carga.
- Se Corrige  $R_1$  y  $R_2$  para la temperatura especificada, y se determina el desempeño para los puntos de carga deseados siguiendo el formato mostrado en 9.2.
- Se calcula la pérdida dispersa en la carga.
- Se realiza el método C/F donde la pérdida dispersa de carga deberá ser determinada para ambos puntos de carga como motor y como generador y se calculan los valores promedio de la pérdida dispersa en la carga y la corriente del rotor.
- Se realiza método de prueba E/F
- Se realiza método de prueba E1/F1

### **3.5. MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA Y LAS PERDIDAS SEGÚN LA NORMA IEC60034-2-1**

#### **3.5.1 Métodos para la determinación de la eficiencia y las pérdidas según la norma IEC 60034-2-1. Descripción general de los métodos para determinar la eficiencia y pérdidas según la norma IEC 60034-2-1:**

##### **3.5.1.1 Métodos directos.**

- **Método 8.1.1 Ensayo de medición del par.** En este ensayo se determina la potencia mecánica de salida de una maquina funcionando como motor, mediante la medición del par del eje por medio de un torquímetro y con la velocidad de rotación.



Este ensayo se hace para maquinas polifásicas y monofásicas menor o igual a 1kW

➤ **Procedimiento de la prueba**

- Se miden las potencias de entrada y salida como motor y como generador.
- Se acopla el motor a un torquímetro y se registran los valores de tensión promedio en terminales, promedio de la corriente de línea, potencia eléctrica excluyendo la excitación, velocidad de funcionamiento, par de la maquina N-M y temperatura de entrada del refrigerante primario

- Se calcula la eficiencia de acuerdo a  $\eta = \frac{P_2}{P_1}$

• **Método 8.1.2 Ensayo de alimentación doble en oposición.** En este ensayo se determina la eficiencia a partir de la mitad de las pérdidas totales y del promedio de la potencia de entrada del motor y del generador así:

Ecuación 31.

$$P_T = \frac{1(P_1 - P_2)}{2}$$

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{\frac{P_1 + P_2}{2}}$$

Ecuación 32.

Este ensayo se hace para maquinas polifásicas y monofásicas menor o igual a 1kW.

➤ **Procedimiento de la prueba**

- Se acoplan mecánicamente dos maquinas iguales.
- Se conecta una maquina como motor y otra como generador.
- Se registran los valores para el motor y para el generador de tensión promedio en terminales, promedio de la corriente de línea, potencia de entrada excluyendo excitación, frecuencia de alimentación, deslizamiento en valor P.U de la velocidad sincrónica, y la temperatura de entrada del refrigerante primario.
- Se calcula la eficiencia de acuerdo a la formula nombrada anteriormente.

### 3.5.1.2 Determinación de eficiencia a partir de medición indirecta.

- **Método 8.2.1 Pérdidas totales a partir del ensayo de alimentación única en oposición.** Ensayo en el cual dos máquinas idénticas son acopladas mecánicamente y conectadas eléctricamente a una misma red, las pérdidas totales de las dos máquinas son iguales a la potencia de entrada de esta red.

Este ensayo se hace para máquinas polifásicas y monofásicas menores o iguales a 1kW.

Cuando las máquinas funcionan en condiciones esencialmente nominales la eficiencia se calcula asignando la mitad de las pérdidas totales a cada máquina.

Ecuación 33.  $\eta = 1 - \frac{PT}{PM}$

#### ➤ Procedimiento de la prueba

- Se calcula (PM) potencia absorbida en los terminales de la máquina que actúa como motor.
- Se calcula (PT) definidas como la mitad de la potencia total absorbida para máquinas de inducción de rotor devanado
- El devanado del rotor del motor debe estar en cortocircuito y el devanado del rotor del generador debe estar conectado a una alimentación polifásica.
- Se registran los valores de tensión promedio en terminales, potencia de entrada, promedio de la corriente de línea, potencia del motor, potencia del generador y temperatura de entrada del refrigerante.
- Se realiza el cálculo de las pérdidas totales con carga considerando las pérdidas por fricción, ventilación y del hierro y se realiza el cálculo de las pérdidas del estator y rotor haciendo la corrección por temperatura a 25 grados centígrados.
- Se calculan las pérdidas eléctricas en las escobillas únicamente si es rotor devanado.
- Se calculan las pérdidas por fricción, ventilación y pérdidas en el hierro.

- Se realiza prueba con carga y se calculan las perdidas del estator y el rotor y se hace la corrección por temperatura a 25 grados.
- Se calculan las perdidas eléctricas en las escobillas (únicamente rotor devanado).
- Se calculan las perdidas a partir del ensayo con carga a tensión reducida.
- Se calcula la eficiencia de acuerdo a la formula y a las pérdidas totales encontradas.

Ecuación 34. 
$$\eta = \frac{P_1 - P_T}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_T}$$

- **Método 8.2.2. Sumatoria de pérdidas con o sin ensayo en carga**

- **Método 8.2.2.5.1 A partir de un ensayo de carga con medición del par.**  
Ensayo en el cual se realiza la determinación indirecta de la eficiencia mediante la medición de la potencia de entrada determinando las pérdidas totales para restarlas de la potencia de entrada y conocer la potencia de salida, donde:

$$P_{Lr} = P_1 - P_2 - P_s - P_r - P_{fe} - P_{fw}$$

$$P_2 = 2\pi n T$$

$P_{Lr}$  = Perdidas residuales.

$P_1$  = Potencia entrada.

$P_2$  = Potencia salida.

$P_s$  = Perdidas devanado estator.

$P_r$  = Perdidas devanado rotor.

$P_{fe}$  = perdidas en el hierro.

$P_{fw}$  = Perdidas por fricción y ventilación.

- **Determinación de los parámetros:**

- Antes de empezar el registro de los datos, la temperatura de los devanados deben estar en el rango de 5k de la temperatura.
- Se debe aplicar la carga a la maquina en 6 puntos de carga, 4 puntos entre 25% y 100% de la carga y 2 puntos entre 100% y 150% de la carga sin exceder el 150%.

- Se debe hacer la prueba iniciando en el valor de carga más alto e ir descendiendo.

- Por cada punto de carga se deben registrar los valores de U, I, P<sub>1</sub>, R, n, f, T

U = Tensión promedio en terminales

I = Promedio de la corriente de línea

P<sub>1</sub> = Potencia de entrada

R = Resistencia del devanado

n = Velocidad de funcionamiento

f = Frecuencia de alimentación Hz

T = Par de la maquina N-m

- **P<sub>s</sub> Pérdidas del devanado del estator y corrección por temperatura.**

Las pérdidas no corregidas para cada punto se determinan a partir de:

**Ecuación 35.**  $P_s = 1,5 \times I^2 \times R$

Las pérdidas corregidas del devanado del estator se determinan con una temperatura de 25 grados a partir de:

**Ecuación 36.**  $P_{s,g} = P_s \times K_\theta$

- **P<sub>fe</sub> Pérdidas en el hierro.** A partir de los valores de tensión entre 60% y 125% de la tensión nominal, se traza una curva de P<sub>fe</sub> = P<sub>k</sub> – P<sub>fw</sub> vs la tensión U<sub>0</sub> las pérdidas en el hierro del punto de carga deseado se toman de la curva en la tensión U<sub>r</sub> donde:

**Ecuación 37.** 
$$U_r = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cos \phi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \sin \phi\right)^2}$$

Ecuación 38.  $\cos \phi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I}$

Ecuación 39.  $\sin \phi = \sqrt{1 - \cos^2 \phi}$

- **P<sub>fw</sub> Pérdidas por fricción y ventilación.** A partir de los puntos de pérdida en vacío se desarrolla una curva de pérdidas fijas (Pk) en función de la tensión al cuadrado (U<sub>0</sub><sup>2</sup>), se extrapola una línea recta hasta la tensión cero y la intersección con el eje de tensión constituyen las pérdidas por fricción y ventilación.
- **P<sub>r</sub> Perdidas en el devanado del rotor y corrección por temperatura.** Las pérdidas no corregidas para cada punto de carga son:

Ecuación 40.  $P_r = (P_1 - P_s - P_{fe}) \times S$

donde  $S = 1 - \frac{(P_{xm})}{f}$

Las pérdidas corregidas del devanado del rotor se determinan con una temperatura de 25 grados

Ecuación 41.  $P_{re} = (P_1 - P_{se} - P_{fe}) \times S_e$

- **Ajuste de los datos de pérdidas residuales.** Los datos de pérdida residual se deben ajustar utilizando un análisis de regresión lineal

Ecuación 42.  $P_{Lr} = AxT^2 + B$

Donde:

T = Par de la maquina Nm

A y B = Son constantes determinadas a partir de seis puntos de carga que se calculan con las siguientes ecuaciones.

A es la pendiente

Ecuación 43. 
$$A = \frac{i \sum (P_i) x T^2 - (\sum P_i x \sum T^2)}{i x \sum (T^2)^2 - \sum (T^2)^2}$$

B es la intersección

Ecuación 44. 
$$B = \frac{\sum P_i}{i} - Ax \frac{\sum T^2}{i}$$

i es la cantidad de puntos de carga

- **Perdidas Adicionales con carga  $P_{LL}$ .** Por cada punto de carga se debe determinar un valor de pérdidas adicionales con carga que esta dado en la siguiente ecuación:

Ecuación 45. 
$$P_{LL} = AxT^2$$

**Eficiencia.** La eficiencia se determina a partir de:

Ecuación 46. 
$$\eta = \frac{P_1 - P_T}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_T}$$

Donde:

$P_1$  = Potencia de entrada a partir del ensayo de carga nominal.

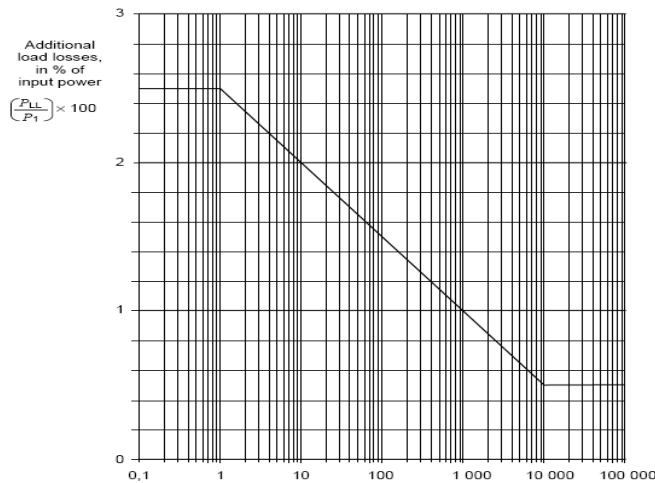
$P_2$  = Potencia de salida.

$P_T$  = Perdidas totales.

### 3.5.1.3 Métodos propuestos por la norma IEC600342-1 para determinar las pérdidas adicionales en carga.

- **Método 8.2.2.5.3 PLL a partir de pérdidas asignadas.** El valor de las pérdidas adicionales con carga PLL a la carga nominal se puede determinar como porcentaje de la potencia de entrada P1 utilizando la curva de la figura 5.

Figura 5. Curva obtención pérdidas adicionales en función de la potencia útil



**Fuente:** IEC Standard 600034-2-1, Rotating Electrical Machines. Part 2-1: Standard for determining losses and efficiency from tests excluding machines for traction vehicles. Switzerland: IEC, 2007. 80 p. IEC Standard 600034-2-1

Los valores de la curva se pueden obtener mediante las siguientes ecuaciones:

**Ecuación 47.**  $P_2 \leq 1kW$   $P_{LL} = P_1 \times 0.025$

**Ecuación 48.**  $1kW < P_1 < 10000kW$   $P_{LL} = P_1 \times \left[ 0.025 - 0.005 \log_{10} \left( \frac{P_1}{1kW} \right) \right]$

**Ecuación 49.**  $P_1 \geq 10000kW$   $P_{LL} = P_1 \times 0.005$

Para cargas diferentes de las nominales, se debe asumir que las pérdidas adicionales con carga varían con el cuadrado de la corriente primaria menos el cuadrado de la corriente en vacío.

- **Método 8.2.2.5.2 A partir de un ensayo sin el rotor.** Ensayo combinado en el cual las pérdidas adicionales de carga se determinan a partir del ensayo sin rotor y del ensayo con el rotor funcionando en dirección inversa al campo magnético rotatorio.

Este es un ensayo combinado que requiere dos ensayos individuales

- Sin el rotor, para las pérdidas adicionales en frecuencia fundamental.
- Con la máquina rotando a velocidad sincrónica opuesta al campo magnético, impulsada por medios externos.

En ambos ensayos, el estator se debe alimentar con una corriente polifásica equilibrada con frecuencia nominal para cuatro corrientes entre 25% y 100% de la corriente nominal y dos corrientes por encima y no superiores a 150% de la corriente nominal.

Se debe calcular la corriente de carga de rotor  $I_L$ :

**Ecuación 50.** 
$$I_L = \sqrt{I^2 - I_0^2}$$

Donde:

$I$  = Valor de la corriente del estator durante el ensayo proporcionando una corriente de carga deseada

$I_0$  = Corriente en vacío con tensión nominal

- **Ensayo sin el rotor.** Para este ensayo todas las partes en las cuales se pueden inducir corrientes parásitas, como las tapas y las partes de los rodamientos deben estar en su lugar.

- **Ensayo de rotación inversa.** Se debe acoplar una máquina totalmente ensamblada a un motor de impulsión con una capacidad de salida no inferior a la



pérdida total nominal y no superior a cinco veces las pérdidas nominales de la máquina que se somete a ensayo.

Cuando se utiliza torquímetro para determinar la potencia del eje, su par máximo no debe exceder 10 veces el par que corresponde a la pérdida total nominal de la máquina que se ensaya. Para máquinas con rotor devanado, los terminales deben estar en cortocircuito.

Este ensayo consiste en:

- Se debe impulsar la máquina a velocidad síncrona en dirección inversa a la rotación cuando se alimenta en secuencia de fase normal.
- Sin aplicar tensión al estator hasta que las pérdidas por fricción se estabilicen, se debe registrar  $P_{0rr}$  suministrada por la máquina de impulsión con  $I = 0$ .
- Aplicando tensión al estator para obtener los valores de la corriente del estator iguales a aquellos para el ensayo sin rotor, se deben registrar:

$I_{Lrr}$  = Corriente

$R_{rr}$  = Resistencia

$P_{1,rr}$  = Potencia de entrada

$\theta_{w,rr}$  = Temperatura del devanado

- **Método 8.2.2.5.3 A partir de un ensayo en estrella Eh.** En este ensayo el motor funciona en una conexión en estrella con tensión desequilibrada.

- **Determinación de los parámetros.** Los motores con valores nominales para conexiones delta y conectados a este tipo de conexión se deben reconectar en estrella durante este ensayo. El punto de estrella no se debe conectar ni al neutro del sistema ni a tierra, para evitar corrientes de secuencia cero.

La tercera fase del motor se debe conectar a la línea de energía por medio de una resistencia la cual debe tener valores para motores en estrella y en delta así:

- Para motores con condiciones nominales para conexión en estrella

**Ecuación 51.** 
$$R_{eh} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \times 0.2$$

- Para motores con condiciones normales para conexión delta

**Ecuación 52.** 
$$R_{eh} = \frac{\sqrt{3} \times U_N}{I_N} \times 0.2$$

La resistencia  $R_{eh}$  utilizada durante el ensayo se debe ajustar para que la corriente de secuencia positiva  $I_1$  permanezca por debajo del 30% de la corriente de secuencia negativa  $I_2$  y la velocidad permanezca en el rango típico del motor cercano a la velocidad nominal.

La corriente de ensayo  $I_t$  está dada por:

- Motores conexión en estrella

**Ecuación 53.** 
$$I_t = \sqrt{I_N^2 - I_0^2}$$

- Motores conexión en delta

**Ecuación 54.** 
$$I_t = \frac{\sqrt{I_N^2 - I_0^2}}{\sqrt{3}}$$

La tensión de ensayo  $U_t$  está dada por:

- Motores conexión en estrella

$$U_t = U_N$$

- Motores conexión en delta

$$U_t = U_N \times \sqrt{3}$$

- **Procedimiento de la prueba:**

- Antes de realizar la prueba se deben estabilizar las perdidas en vacio.
- Se deben registrar los valores de la resistencia entre los terminales V y W antes y después del ensayo completo.
- El ensayo se debe realizar en una maquina fría y lo más rápido que sea posible para evitar calentamiento desigual en las fases.
- Los motores grandes solamente se pueden arrancar sin la resistencia.
- Los motores más pequeños deben arrancar con el resistor  $R_{eh}$  ya conectado.
- Se debe variar la tensión de suministro para seis puntos de ensayo, los puntos de ensayo se deben seleccionar de modo que estén separados aproximadamente una distancia igual entre 150% y 75% de la corriente de fase nominal.
- Se debe iniciar el ensayo con la corriente más alta e ir en orden descendente.
- Para cada punto de ensayo se deben registrar los valores de:

**Tabla 4. Registro de los valores punto de ensayo**

$I_u$	Corriente fase U
$I_v$	Corriente fase V
$I_w$	Corriente fase W
$U_{uw}$	Tensión uw
$U_{vw}$	Tensión vw
$U_{wu}$	Tensión wu
$P_{uv}$	Potencia uv
$P_{wv}$	Potencia wv
N	Velocidad de funcionamiento

Se deben ajustar los datos de pérdidas adicionales con carga utilizando el análisis de regresión lineal.

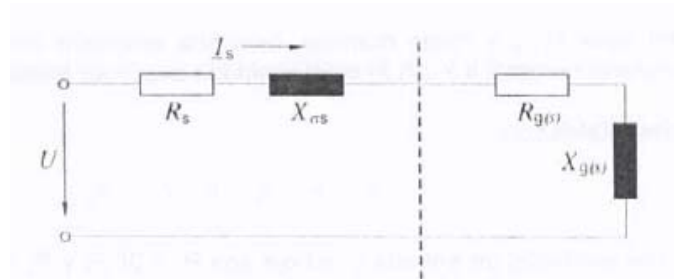
- Las pérdidas se deben expresar en función del cuadrado de la relación entre la corriente de secuencia negativa  $I_{i(2)}$  y la corriente de ensayo  $I_t$ , así:

**Ecuación 55.** 
$$P_{Lr} = Ax \left[ \frac{I_{i(2)}}{I_t} \right]^2 + B$$

#### 3.5.1.4 Sumatoria de pérdidas, sin ensayo en carga.

- **Método 8.2.2.4.3 Pérdidas a partir del método de circuito equivalente.** Ensayo mediante el cual las pérdidas se determinan con la ayuda de un modelo de circuito equivalente, según figura 6.

Figura 6. Circuito equivalente



**Fuente:** IEEE. 112 - 2004 Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators [Base de Datos]. New york: IEEE, Power Engineering Society, 1984 [Consultado 20 de mayo de 2010]. Disponible en Internet:

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=30683&isnumber=1303>

Este método se puede aplicar cuando no es posible realizar el ensayo con carga. Donde las magnitudes y parámetros del rotor están referenciados al estator.

Cuando se va a aplicar este método en máquinas de inducción de jaula de ardilla se requieren los valores de relación entre la reactancia de dispersión del estator y la reactancia de dispersión del rotor referida al estator, el coeficiente de temperatura de los devanados del rotor y la reactancia de dispersión del estator y reactancia de magnetización.

- **Procedimiento de la prueba**
  - Se calculan las reactancias a partir del ensayo en vacío y ensayo de rotor bloqueado.
  - Se calcula la resistencia de pérdidas en el hierro.
  - Se calcula la resistencia del rotor no corregida.

- Se calcula la resistencia del rotor corregida a la temperatura en referencia.
- Se calculan las impedancias dependientes de la carga.
- Se calculan la impedancia resultante vista desde los terminales.
- Se calculan las corrientes de fase del estator y del rotor.
- Se calculan las pérdidas en el hierro.
- Se calculan las pérdidas en los devanados del rotor y del estator.
- Se calculan las pérdidas adicionales con carga.
- Cuando se tienen las pérdidas totales se calcula la eficiencia en operación como motor con la formula.

**Ecuación 56.**  $\eta = \frac{P_2}{P_1}$

### 3.6. RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS DE LOS MÉTODOS SIMILARES

**3.6.1 Suministro de potencia.** La calidad de la energía eléctrica puede definirse como una ausencia de interrupciones, sobre tensiones y deformaciones producidas por armónicas en la red y variaciones de voltaje RMS suministrado al usuario; esto referido a la estabilidad del voltaje, la frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico.

Asimismo se ha determinado que uno de los problemas más comunes que ocasiona el desperdicio de energía eléctrica en las empresas es la calidad de esta, pues influye en la eficiencia de los motores que la usan. Un motor alimentado con un voltaje y corriente distorsionado se sobrecalienta debido a las corrientes parásitas y al “Efecto Piel”. Esto origina pérdidas adicionales en el motor, y tienden a invertir su dirección, reduciendo el torque y ocasionando vibraciones.

Por estas razones para una mejor toma de datos en el cálculo de pérdidas se recomienda seguir los parámetros de la tabla 5:

**Tabla 5. Suministro de potencia para las pruebas de eficiencia**

	IEEE112	IEC60034-2-1
<b>SUMINISTRO DE POTENCIA</b>		
<b>VOLTAJE</b>	Desbalance de voltaje no debe exceder el 0,5%	Desbalance de voltaje no debe exceder el 0,25%
<b>FRECUENCIA</b>	La frecuencia debe estar dentro de $\pm 0.5\%$ del valor requerido por la prueba que se está realizando. Con los métodos A,B y B1 la frecuencia debe estar dentro de $\pm 0.1\%$ del valor de la prueba específica	La frecuencia debe estar en el rango de 0,3% de la frecuencia nominal durante las mediciones
<b>DTA MAXIMA (%)</b>	1.5 <sup>1</sup>	

Parámetro	IEC	IEEE
<b>DTA Máxima (%)</b>	1.5 <sup>1</sup>	
<b>Desbalance de voltaje máximo (%)</b>	0.5 <sup>2</sup>	0.5
<b>Desviación máxima del voltaje nominal (%)</b>	-	-
<b>Desviación máxima de la frecuencia nominal (%)</b>	0.1 – 0.3	0.1

A continuación se hace un resumen de características y se muestran las principales diferencias entre los métodos 8.2.2.5.1 y 8.2.2.5.3 de la norma IEC60034-2-1 respecto a los métodos B y E1 de la IEEE 112, podemos ver que existe una equivalencia entre los métodos 8.2.2.5.1 de la IEC60034-2-1 y el método B de la IEEE 112.

### 3.6.2 Método IEC 8.2.2.5.1

- **Perdidas Residuales.** Las pérdidas residuales para este método se deben determinar para cada punto de carga. Se debe restar de la potencia de entrada la suma de las pérdidas en el hierro, pérdidas devanado estator, pérdidas rotor, pérdidas por fricción y rozamiento, donde:

**Ecuación 57.**  $P_{lor} = P_1 + P_2 + P_s + P_r + P_{fe} + P_{fw}$

- **Perdidas devanado estator ( $P_s$ ).** Las pérdidas del devanado del estator para cada punto de carga se deben calcular con la siguiente fórmula:

**Ecuación 58.**  $P_s = 1.5 \times I^2 \times R$

Las pérdidas del devanado del estator corregidas se determinan para una temperatura del refrigerante de 25 C donde:

**Ecuación 59.**  $P_{se} = P_s \times k_e$

Siendo

**Ecuación 60.**  $k_e = \frac{235 + \theta_w + 25 - \theta_c}{235 + \theta_w}$

$\theta_w$  = Temperatura del devanado

$\theta_c$  = Temperatura del refrigerante

$K_e$  = Factor corrección de temperatura

235 = Constante de temperatura para el cobre

- **Perdidas en el hierro o núcleo ( $P_{fe}$ ).** Se debe trazar una curva de  $P_{fe} = P_k - P_{fw}$  vs la tensión  $U_v$  entre el 60% y el 125% de los puntos de carga, se debe calcular la ecuación de esa curva haciendo una estimación polinómica, y se reemplaza  $U_r$  de acuerdo a la siguiente fórmula para cada punto de carga.

Ecuación 61. 
$$U_r = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} * I * R \cos \phi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} * I * R \sin \phi\right)^2}$$

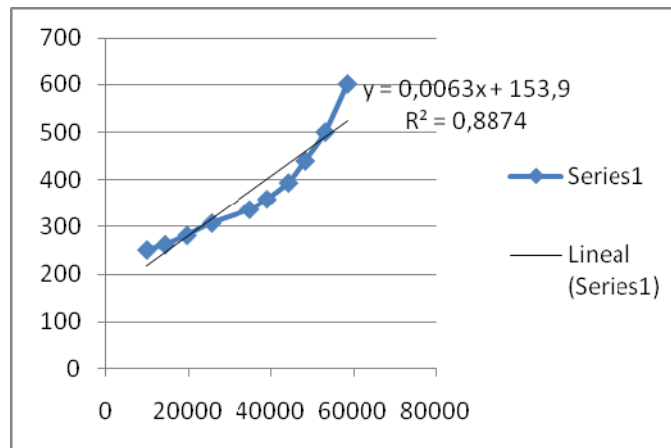
Ecuación 62. 
$$\cos \phi = \frac{P_1}{\sqrt{3} * U * I}$$

Ecuación 63. 
$$\sin \phi = \sqrt{1 - \cos^2 \phi}$$

Este cálculo no requiere corrección

- **Pérdidas por fricción y rozamiento con el aire  $P_{fr}$ .** Se debe realizar una curva de perdidas fijas en función de la tensión al cuadrado con los puntos determinados de perdida en vacío, después se linealiza la curva mediante un análisis de regresión lineal, y el corte con el eje Y es el valor de las perdidas por fricción y rozamiento, lo podemos ver en la figura 7.

Figura 7. Curva de pérdidas por fricción y rozamiento con el aire



Aquí podemos ver en la figura 6, la curva de perdidas fijas en función de la tensión al cuadrado con los puntos determinados de perdida en vacío, y la linealización que nos indica las perdidas por fricción y rozamiento.



Este cálculo no requiere corrección.

- **Perdidas en el devanado del rotor  $P_r$ .** Se debe restar de la potencia medida en cada punto de carga, las pérdidas del devanado del estator y las pérdidas en el hierro, después este valor se multiplica por el deslizamiento según la siguiente fórmula:

**Ecuación 64.**  $P_r = (P_1 - P_2 - P_{fe}) \times S$

Donde:

**Ecuación 65.**  $S = 1 - \frac{(P_{xm})}{P}$

Las pérdidas corregidas en el devanado del rotor en cualquier punto de carga, se determinan con una temperatura de referencia del refrigerante de 25 C, según la siguiente fórmula:

**Ecuación 66.**  $P_{r,e} = (P_1 - P_{2,e} - P_{fe}) \times S_e$

Donde:

**Ecuación 67.**  $S_e = S \times k_e$  y

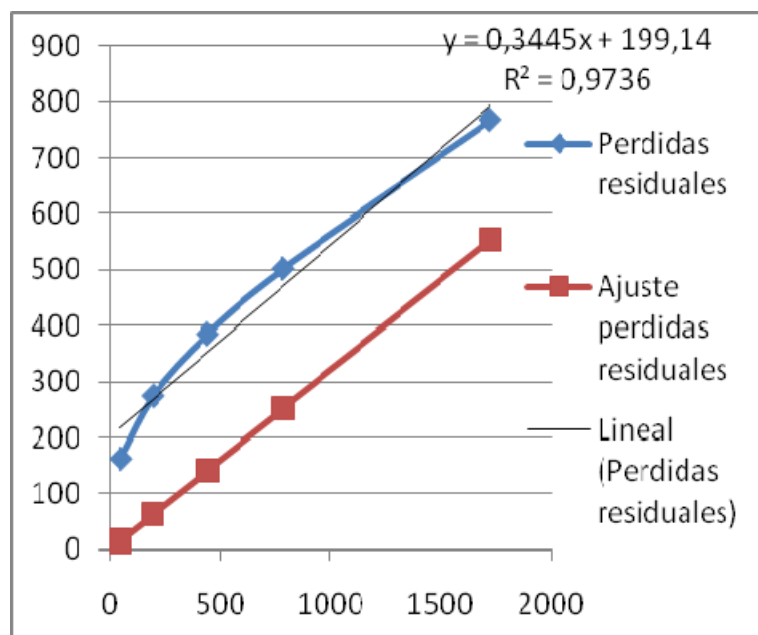
**Ecuación 68.**  $k_e = \frac{235 + \theta_w + 25 - \theta_c}{235 + \theta_w}$

- **Perdidas adicionales con carga  $P_{LL}$ .** La norma IEC 60034-2-1 ofrece diferentes métodos para obtener las pérdidas adicionales con carga, que son los siguientes:

- **A partir de las pérdidas residuales.** Se debe realizar una curva de las pérdidas residuales en función del torque al cuadrado, después se linealiza y se encuentra la pendiente de esa curva, después de encontrar la pendiente esta se multiplica por el torque al cuadrado de cada punto de carga como lo vemos en la figura 8:

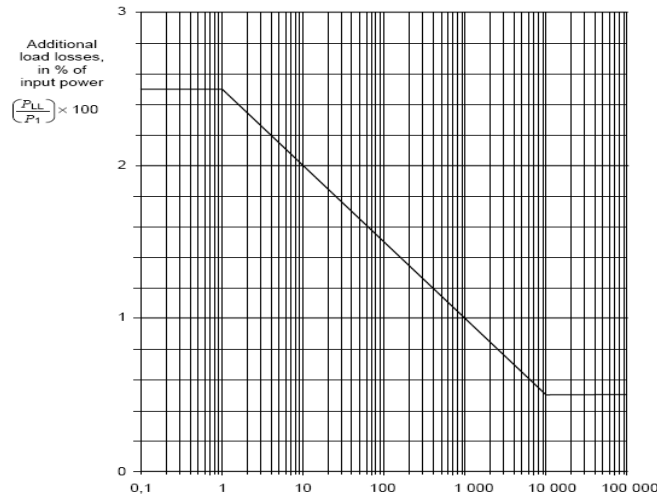
**Ecuación 69.**  $P_{LL} = A \times T^2$

Figura 8. Curva de pérdidas residuales en función del torque al cuadrado



- **Asignación de pérdidas.** La asignación de pérdidas se hace a partir de la siguiente función a trozos en la figura 9, donde dependiendo de la potencia nominal del motor se escoge la ecuación adecuada para el cálculo de las pérdidas adicionales con carga.

Figura 9. Curva obtención pérdidas adicionales en función de la potencia útil



Fuente: IEC Standard 600034-2-1, Rotating Electrical Machines. Part 2-1: Standard for determining losses and efficiency from tests excluding machines for traction vehicles. Switzerland: IEC, 2007. 80 p. IEC Standard 600034-2-1

Los valores de la curva se pueden obtener mediante las siguientes ecuaciones:

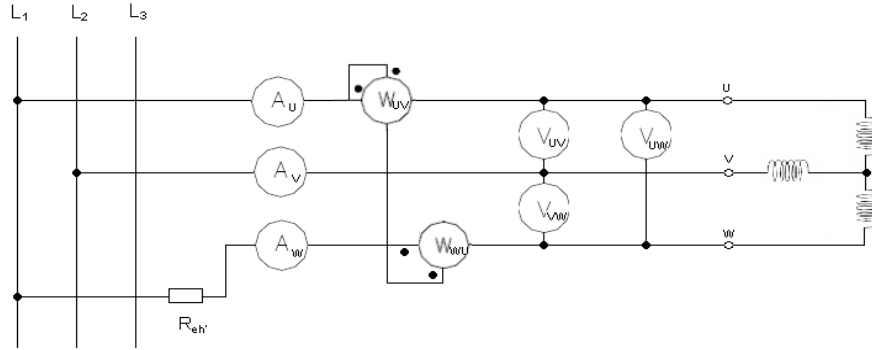
**Ecuación 70.**  $P_1 \leq 1\text{ kW}$   $P_{LL} = P_1 \times 0.025$

**Ecuación 71.**  $1\text{ kW} \leq P_1 \leq 10000\text{ kW}$   $P_{LL} = P_1 \left[ 0.025 - 0.005 \log_{10} \left( \frac{P_1}{1\text{ kW}} \right) \right]$

**Ecuación 72.**  $P_1 \geq 10000\text{ kW}$   $P_{LL} = P_1 \times 0.005$

- **Ensayo Eh star.** Este método para obtener las pérdidas residuales, consiste en desequilibrar las fases del motor, conectando dos fases del motor a una misma fase y una de estas fases conectada a una resistencia para obtener una circulación de corriente mayor por esta fase, como se muestra en la figura 10.

Figura 10. Circuito de ensayo en estrella Eh



**Fuente:** IEC Standard 600034-2-1, Rotating Electrical Machines. Part 2-1: Standard for determining losses and efficiency from tests excluding machines for traction vehicles. Switzerland: IEC, 2007. 80 p. IEC Standard 600034-2-1

Para motores con conexión en estrella:

**Ecuación 73.** 
$$R_{eh} = \frac{U_N}{\sqrt{3} \times I_N} \times 0,2$$

Para motores con conexión en delta:

**Ecuación 74.** 
$$R_{eh} = \frac{\sqrt{3} \times U_N}{I_N}$$

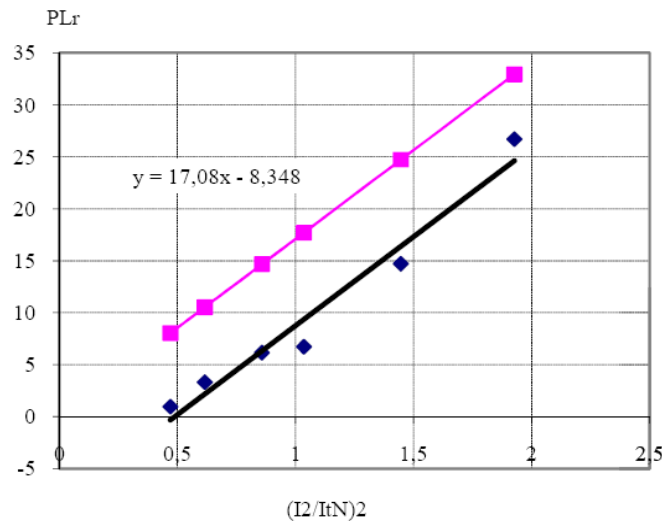
Los datos de pérdidas adicionales se obtienen haciendo un análisis de regresión lineal y se expresan en función del cuadrado de la relación entre la corriente de secuencia negativa  $I_{N2}$  y la corriente de ensayo  $I_t$ .

**Ecuación 75.** 
$$P_{Lr} = A \times \left[ \frac{I_{N2}}{I_t} \right]^2 + B$$

Después se determina la pendiente de esta grafica y se multiplica por el torque al cuadrado para determinar las pérdidas adicionales con carga, como se muestra en la figura 11.

**Ecuación 76.** 
$$P_{Lc} = A \times T^2$$

Figura 11. Curva de pérdidas adicionales en carga



**Fuente:** ALVAREZ, Noelia. Analisis de diferentes procedimientos y ensayos para la determinación del rendimiento en motores de inducción trifásicos [en línea]. Cataluña: Universidad Politecnica de Cataluña, 2004 [consultado 20 de mayo de 2010]. Disponible en Internet:

<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/4615/4/Resumen>

En esta grafica podemos ver la regresión en negro, y la corrección en rosado donde indica el valor de las pérdidas adicionales en carga.

**3.6.3 Método B IEEE112.** Al igual que el método IEC 8.2.2.5.1 se debe calcular la potencia de entrada para cada punto de carga y se restan las perdidas en el hierro, perdidas en el devanado del rotor y del estator, perdidas por fricción y rozamiento y la pérdida dispersa en la carga.

- **Pérdidas en el devanado del estator.** Las pérdidas del devanado del estator se calculan de acuerdo a la siguiente ecuación:

**Ecuación 77.**  $P_s = 1,5 \times I^2 \times R$

Para calcular las pérdidas del estator corregidas se debe corregir la resistencia según la siguiente fórmula:

**Ecuación 78.**  $R_s = \frac{R_s (t_s + K_2)}{t_s + K_1}$

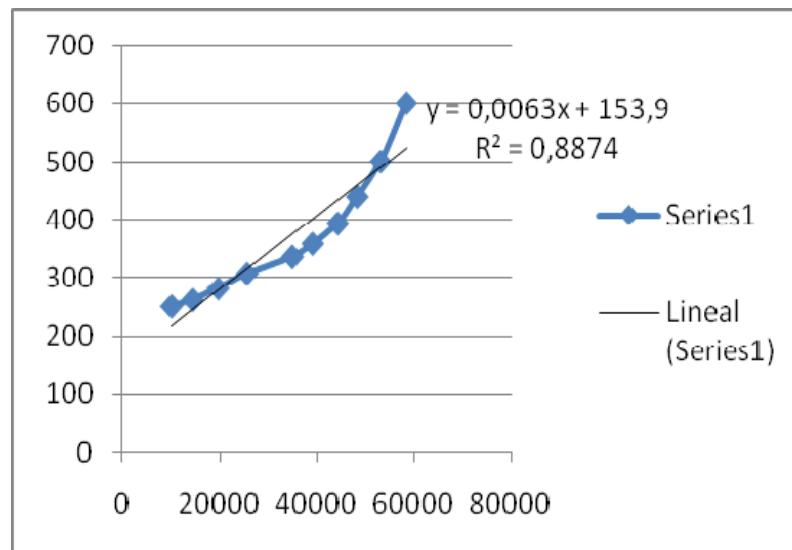
Donde  $K_1 = 234,5$

- **Perdidas en el hierro o núcleo.** Las pérdidas en el núcleo se calculan restándole a la potencia en vacío a voltaje nominal las pérdidas por fricción y rozamiento y las pérdidas en el estator en vacío a voltaje nominal.

Ecuación 79.  $P_{fe} = P_0 - P_{fr} - I^2 R_{Estator}$

- **Perdidas por fricción y rozamiento con el aire.** Al igual que la norma IEC el cálculo de las pérdidas por fricción y rozamiento con el aire, se debe realizar utilizando un análisis de regresión lineal de la grafica de potencia de entrada menos la pérdida  $I^2 R$  versus el voltaje al cuadrado de los puntos de pérdida en vacío, como se muestra en la figura 12.

Figura 12. Curva de pérdidas por fricción y rozamiento con el aire



- **Perdidas en el devanado del rotor.** Se debe restar de la potencia medida en cada punto las pérdidas en el estator y las pérdidas en el núcleo, y este valor se multiplica por el deslizamiento según la siguiente formula

Ecuación 80.  $R_r = (P_1 - P_2 - P_{fe}) \times S$

La corrección de estas pérdidas se realiza con la corrección del deslizamiento según la formula

**Ecuación 81.** 
$$S_s = \frac{S_e \phi_s + K_1}{\phi_s + K_1}$$

Donde  $K_1 = 234,5$

Calculamos las perdidas del devanado del estator corregidas de la siguiente forma

**Ecuación 82.** 
$$P_{sc} \text{ corregida} = (P_L - P_{sc} \text{ corregida} - P_{fe}) \times S_{sc} \text{ corregida}$$

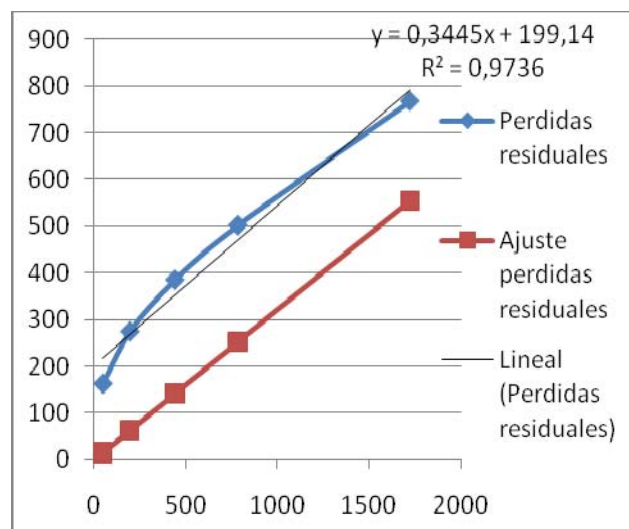
- **Pérdidas adicionales con carga PII.** Se debe realizar la resta entre las pérdidas totales aparentes menos las perdidas convencionales. Esto me da las perdidas adicionales sin corrección.

Pérdidas totales aparentes = Potencia de entrada – Potencia en el eje

Perdidas convencionales = sumatoria de perdidas

Estas pérdidas adicionales se grafican en función del torque al cuadrado, después se encuentra la pendiente de esta curva y se multiplica por el torque al cuadrado, para encontrar las perdidas adicionales o perdida dispersa en la carga corregida, según la figura 13.

Figura 13. Curva de pérdidas residuales



- **Pérdida dispersa en la carga asumida.** El valor de la pérdida dispersa en la carga o pérdidas adicionales con carga nominal se pueden asumir según la tabla 6.

**Tabla 6. Pérdida dispersa en la carga asumida**

Valores nominales de la maquina en kW	Porcentaje de la pérdida miscelanea en la carga de la carga nominal
1–90	1.8%
91–375	1.5%
376–1850	1.2%
1851 y mayores	0.9%

**Fuente:** IEEE. 112 - 2004 Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators [Base de Datos]. New york: IEEE, Power Engineering Society, 1984 [Consultado 20 de mayo de 2010]. Disponible en Internet: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=30683&isnumber=1303>

Para calcular un valor de las pérdidas que no sea la carga nominal se debe asumir que la pérdida dispersa en la carga es proporcional al cuadrado de la corriente de rotor según la siguiente formula

**Ecuación 83.** 
$$P_{sL} = P_{sL}^{\prime} \left( \frac{I_2}{I_2^{\prime}} \right)^2$$

Siendo  $P_{sL}^{\prime}$  y  $I_2^{\prime}$  valores nominales e  $I_2$  el valor de la corriente de rotor para el punto de carga deseado de la pérdida dispersa en la carga.

A continuación en la tabla 7 se muestra un cuadro comparativo entre los métodos 8.2.2.5.1 y 8.2.2.5.3 de la norma IEC60034-2-1 respecto a los métodos B y E1 de la IEEE 112



**Tabla 7. Cuadro comparativo entre los métodos 8.2.2.5.1 y 8.2.2.5.3 de la norma IEC60034-2-1 respecto a los métodos B y E1 de la IEEE 112**

	Norma IEC60034-2-1	Norma IEEE112
<b>Perdidas Residuales</b>	Las pérdidas residuales para este método se deben determinar para cada punto de carga. Se debe restar de la potencia de entrada la suma de las pérdidas en el hierro, pérdidas devanado estator, pérdidas rotor, pérdidas por fricción y rozamiento, donde: $P_{Lr} = P_{1r} + P_{2r} + P_{3r} + P_{4r} + P_{5r} + P_{6r}$ $P_{Lr} = P_{1r} + P_{2r} + P_{3r} + P_{4r} + P_{5r} + P_{6r}$	Al igual que el método IEC 8.2.2.5.1 se debe calcular la potencia de entrada para cada punto de carga y se restan las pérdidas en el hierro, pérdidas en el devanado del rotor y del estator, pérdidas por fricción y rozamiento y la pérdida dispersa en la carga.
<b>Perdidas Devanado Estator</b>	Las pérdidas del devanado del estator para cada punto de carga se deben calcular con la siguiente fórmula: $P_s = 1.5 \times I^2 \times R$ Las pérdidas del devanado del estator corregidas se determinan para una temperatura del refrigerante de 25 C donde: $P_{s\theta} = P_s \times k_\theta$ Siendo $k_\theta = \frac{235 + \theta_W + 25 - \theta_C}{235 + \theta_W}$	Las pérdidas del devanado del estator se calculan de acuerdo a la siguiente ecuación: $P_s = 1.5 \times I^2 \times R$ Para calcular las pérdidas del estator corregidas se debe corregir la resistencia según la siguiente fórmula: $R_b = \frac{R_a(t_b + K_1)}{t_a + K_1}$ Donde $K_1 = 234,5$
<b>Perdidas en el Hierro o Nucleo</b>	Se debe trazar una curva de $P_{fe} = P_k - P_{fw}$ vs la tensión $U_0$ entre el 60% y el 125% de los puntos de carga, se debe calcular la ecuación de esa curva haciendo una estimación polinómica, y se reemplaza $U_r$ de acuerdo a la siguiente fórmula para cada punto de carga. $U_r = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} * I * R \cos \phi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} * I * R \sin \phi\right)^2}$ $\sin \phi = \sqrt{1 - \cos^2 \phi} \quad \cos \phi = \frac{P_1}{\sqrt{3} * U * I}$ Este cálculo no requiere corrección	Las pérdidas en el núcleo se calculan restandole a la potencia en vacío a voltaje nominal las pérdidas por fricción y rozamiento y las pérdidas en el estator en vacío a voltaje nominal. $P_{fe} = P_0 - P_{fw} - I^2 R_{Estator}$

Tabla 7. Continuación

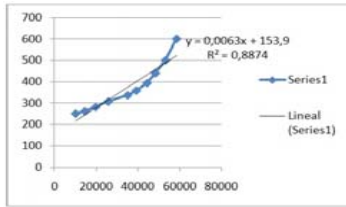
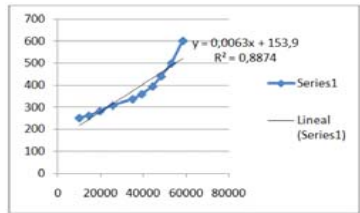
	Norma IEC60034-2-1	Norma IEEE112
Perdidas por fricción y rozamiento con el aire	<p>Se debe realizar una curva de pérdidas fijas en función de la tensión al cuadrado con los puntos determinados de pérdida en vacío, después se linealiza la curva mediante un análisis de regresión lineal, y el corte con el eje Y es el valor de las pérdidas por fricción y rozamiento, lo podemos ver en la siguiente grafica.</p>  <p>Aquí podemos ver la grafica de la curva de pérdidas fijas en función de la tensión al cuadrado con los puntos determinados de pérdida en vacío, y la linealización que nos indica las pérdidas por fricción y rozamiento.</p> <p>Este cálculo no requiere corrección.</p>	<p>Al igual que la norma IEC el cálculo de las pérdidas por fricción y rozamiento con el aire, se debe realizar utilizando un análisis de regresión lineal de la grafica de potencia de entrada menos la pérdida</p> <p><math>I^2 R</math></p> <p>versus el voltaje al cuadrado de los puntos de pérdida en vacío.</p> 
Perdidas en el devanado del rotor	<p>Se debe restar de la potencia medida en cada punto de carga, las pérdidas del devanado del estator y las pérdidas en el hierro, después este valor se multiplica por el deslizamiento según la siguiente fórmula:</p> $P_r = (P_1 - P_s - P_{fe}) \times S$ <p>Donde:</p> $S = 1 - \frac{(P_{xn})}{f}$ <p>Las pérdidas corregidas en el devanado del rotor en cualquier punto de carga, se determinan con una temperatura de referencia del refrigerante de 25 C, según la siguiente fórmula:</p> $P_{r,\theta} = (P_1 - P_{s,\theta} - P_{fe}) \times S_\theta$ <p>Donde:</p> $S_\theta = S \times k_\theta$ <p>y</p> $k_\theta = \frac{235 + \theta_W + 25 - \theta_C}{235 + \theta_W}$	<p>Se debe restar de la potencia medida en cada punto las pérdidas en el estator y las pérdidas en el núcleo, y este valor se multiplica por el deslizamiento según la siguiente formula</p> $P_r = (P_1 - P_s - P_{fe}) \times S$ <p>La corrección de estas pérdidas se realiza con la corrección del deslizamiento según la formula</p> $S_\theta = \frac{S_\theta(t_s + K_1)}{t_s + K_1}$ <p>Donde <math>K_1 = 234,5</math></p> <p>Calculamos las pérdidas del devanado del estator corregidas de la siguiente forma</p> $P_{r\text{ corregida}} = (P_1 - P_{s\text{ corregida}} - P_{fe}) \times S_{\text{corregido}}$

Tabla 7. Continuación

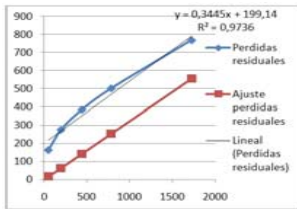
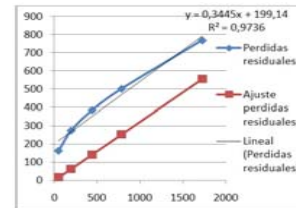
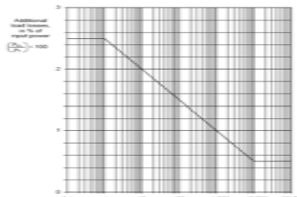
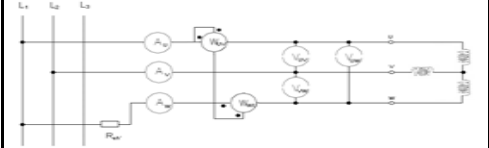
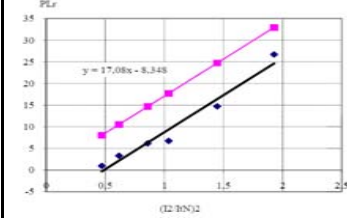
	Norma IEC60034-2-1	Norma IEEE112										
<b>Pérdidas Adicionales con carga</b>	La norma IEC 60034-2-1 ofrece diferentes métodos para obtener las pérdidas adicionales con carga, que son los siguientes	La norma IEEE112 ofrece diferentes métodos para obtener las pérdidas adicionales con carga, que son los siguientes										
<b>A partir de las pérdidas residuales</b>	<p>Se debe realizar una curva de las pérdidas residuales en función del torque al cuadrado, después se linealiza y se encuentra la pendiente de esa curva, después de encontrar la pendiente esta se multiplica por el torque al cuadrado de cada punto de carga así:</p> $P_{LL} = A \times T^2$ 	<p>Se debe realizar la resta entre las pérdidas totales aparentes menos las pérdidas convencionales</p> <p>Esto me da las pérdidas adicionales sin corrección</p> <p>Pérdidas totales aparentes = Potencia de entrada – Potencia en el eje</p> <p>Pérdidas convencionales = sumatoria de pérdidas</p> <p>Estas pérdidas adicionales se grafican en función del torque al cuadrado, después se encuentra la pendiente de esta curva y se multiplica por el torque al cuadrado, para encontrar las pérdidas adicionales o pérdida dispersa en la carga corregida.</p> 										
<b>Asignacion de pérdidas</b>	<p>La asignación de pérdidas se hace a partir de la siguiente función a trozos, donde dependiendo de la potencia nominal del motor se escoge la ecuación adecuada para el cálculo de las pérdidas adicionales con carga.</p>  <p>Los valores de la curva se pueden obtener mediante las siguientes ecuaciones:</p> $P_2 \leq 1kW \quad P_{LL} = P_1 \times 0.025$ $1kW < P_2 < 10000kW \quad P_{LL} = P_1 \times \left[ 0.025 - 0.005 \log_{10} \left( \frac{P_2}{1kW} \right) \right]$ $P_2 \geq 10000kW \quad P_{LL} = P_1 \times 0.005$	<p>Asignacion de pérdidas o pérdida dispersa en la carga asumida se puede asumir según la siguiente tabla</p> <table><tr><th>Valores nominales de la máquina en kW</th><th>Porcentaje de la pérdida miscelanea en la carga de la carga nominal</th></tr><tr><td>1-90</td><td>1.8%</td></tr><tr><td>91-375</td><td>1.5%</td></tr><tr><td>376-1850</td><td>1.2%</td></tr><tr><td>1851 y mayores</td><td>0.9%</td></tr></table> <p>Para calcular un valor de las pérdidas que no sea la carga nominal se debe asumir que la pérdida dispersa en la carga es proporcional al cuadrado de la corriente de rotor según la siguiente formula</p> $P_{sL} = P_{sL}' \left( \frac{I_2}{I_2'} \right)^2$ <p>Siendo <math>P_{sL}'</math> valores nominales e <math>I_2'</math> el valor de la corriente de rotor para el punto de carga deseado de la pérdida dispersa en la carga.</p>	Valores nominales de la máquina en kW	Porcentaje de la pérdida miscelanea en la carga de la carga nominal	1-90	1.8%	91-375	1.5%	376-1850	1.2%	1851 y mayores	0.9%
Valores nominales de la máquina en kW	Porcentaje de la pérdida miscelanea en la carga de la carga nominal											
1-90	1.8%											
91-375	1.5%											
376-1850	1.2%											
1851 y mayores	0.9%											

Tabla 7. Continuación

Ensayo Eh Star	Norma IEC60034-2-1	Norma IEEE112
	<p data-bbox="827 358 1312 440">Este método para obtener las pérdidas residuales, consiste en desequilibrar las fases del motor, conectando dos fases del motor a una misma fase y una de estas fases conectada a una resistencia para obtener una circulación de corriente mayor por esta fase.</p>  <p data-bbox="827 597 1092 617">Para motores con conexión en estrella:</p> $R_{eh} = \frac{U_N}{\sqrt{3} \times I_N} \times 0,2$ <p data-bbox="827 662 1075 682">Para motores con conexión en delta:</p> $R_{eh} = \frac{\sqrt{3} \times U_N}{I_N}$ <p data-bbox="827 727 1312 792">Los datos de pérdidas adicionales se obtienen haciendo un análisis de regresión lineal y se expresan en función del cuadrado de la relación entre la corriente de secuencia negativa</p> $I_{i(2)}$ <p data-bbox="827 812 1029 831">y la corriente de ensayo <math>I_t</math></p> $P_{Lr} = A \times \left[ \frac{I_{i(2)}}{I_t} \right]^2 + B$ <p data-bbox="827 906 1312 945">Después se determina la pendiente de esta grafica y se multiplica por el torque al cuadrado para determinar las pérdidas adicionales con carga.</p> $P_{LL} = A \times T^2$  <p data-bbox="827 1230 1312 1269">En esta grafica podemos ver la regresión en negro, y la corrección en rosado donde indica el valor de las pérdidas adicionales en carga.</p>	<p data-bbox="1312 337 1591 357">Este metodo no esta en la norma IEEE112</p>

#### 4. RESULTADOS OBTENIDOS

Se han realizado los cálculos especificados en las normas, para los métodos 8.2.2.5.1 y 8.2.2.5.3 de la IEC60034-2-1 y los métodos B y E1 de la IEEE con los datos de un motor de inducción trifásico de 10kW. Los datos nominales del motor se indican en la tabla 8.

**Tabla 8. Datos de un motor de inducción trifásico de 10kW**

Motor 10 Hp	
220/440	Voltaje
28,8/14,4	Corriente
1750	rpm
60 Hz	frecuencia

De acuerdo a estos cálculos se han obtenido los siguientes valores de pérdidas para cada punto de carga, donde se puede observar una gran similitud conceptual entre los métodos 8.2.2.5.1 de la IEC60043-2-1 y el método B de la IEEE 112 y el método 8.2.2.5.3 de la IEC60043-2-1 y el método E1 de la IEEE112

**Tabla 9. Norma IEC método 8.2.2.5.1 determinación de las pérdidas adicionales en carga PLL**

<b>PORCENTAJES DE CARGA</b>	<b>25%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>	<b>125%</b>	<b>150%</b>
<b>PERDIDAS POR FRICCIÓN Y ROZAMIENTO CON EL AIRE (W)</b>	153,8985821	153,8985821	153,8985821	153,8985821	153,8985821	153,8985821
<b>PERDIDAS EN EL HIERRO(W)</b>	281,9041953	281,9041953	281,9041953	281,9041953	281,9041953	281,9041953
<b>PERDIDAS EN DEVANADO ESTATOR(W)</b>	106,6520363	137,2135211	179,9761067	239,13096	404,94624	507,6805067
<b>PERDIDAS EN DEVANADO ROTOR(W)</b>	6,71752786	24,5406857	53,51035186	96,98274741	220,8804889	310,1906982
<b>PERDIDAS RESIDUALES(W)</b>	15,85433371	63,41733484	142,6890034	253,6693393	557,2474741	736,1878968
<b>EFICIENCIA (%)</b>	70,26175393	80,35153629	83,22359009	83,82356744	82,6486926	81,50685986

**Tabla 10. Norma IEC Método asignación de pérdidas PLL 8.2.2.5.3**

<b>PORCENTAJES DE CARGA</b>	<b>25%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>	<b>125%</b>	<b>150%</b>
<b>PERDIDAS POR FRICCIÓN Y ROZAMIENTO CON EL AIRE (W)</b>	153,8985821	153,8985821	153,8985821	153,8985821	153,8985821	153,8985821
<b>PERDIDAS EN EL HIERRO(W)</b>	281,9041953	281,9041953	281,9041953	281,9041953	281,9041953	281,9041953
<b>PERDIDAS EN DEVANADO ESTATOR(W)</b>	106,6520363	137,2135211	179,9761067	239,13096	404,94624	507,6805067
<b>PERDIDAS EN DEVANADO ROTOR(W)</b>	6,71752786	24,5406857	53,51035186	96,98274741	220,8804889	310,1906982
<b>PERDIDAS RESIDUALES ASIGNACIÓN DE PERDIDAS(W)</b>	24,95898114	44,19053292	63,57972038	83,28417917	122,5617337	141,3466511
<b>EFICIENCIA(%)</b>	69,78256196	80,92308213	84,85807941	86,51103054	87,30770375	87,03512422

**Tabla 11. Norma IEEE método B entrada salida con segregación de pérdidas y medición indirecta de la perdida dispersa en la carga**

<b>PORCENTAJES DE CARGA</b>	<b>25%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>	<b>125%</b>	<b>150%</b>
<b>PERDIDAS POR FRICCIÓN Y ROZAMIENTO CON EL AIRE (W)</b>	153,89 85821	153,89 85821	153,89 85821	153,89 85821	153,89 85821	153,89 85821
<b>PERDIDAS EN EL HIERRO(W)</b>	286,49 17155	286,49 17155	286,49 17155	286,49 17155	286,49 17155	286,49 17155
<b>PERDIDAS EN DEVANADO ESTATOR(W)</b>	131,30 34246	168,92 88442	221,57 55083	294,40 33239	498,54 48937	625,02 50015
<b>PERDIDAS EN DEVANADO ROTOR(W)</b>	5,8904 79044	21,521 45032	46,684 42337	83,472 44754	183,60 57087	250,15 04181
<b>PERDIDAS RESIDUALES(W)</b>	32,615 11936	144,86 57639	256,03 16541	373,50 01948	549,16 5683	735,30 88045
<b>EFICIENCIA(%)</b>	68,88	79,61	82,80	83,62	82,66	81,76



**Tabla 12. Norma IEEE método E1 medición de potencia eléctrica bajo carga con segregación de perdidas y valor asumido para la pérdida dispersa en la carga**

<b>PORCENTAJES DE CARGA</b>	<b>25%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>	<b>125%</b>	<b>150%</b>
<b>PERDIDAS POR FRICCIÓN Y ROZAMIENTO CON EL AIRE (W)</b>	153,8985821	153,8985821	153,8985821	153,8985821	153,8985821	153,8985821
<b>PERDIDAS EN EL HIERRO(W)</b>	286,4917155	286,4917155	286,4917155	286,4917155	286,4917155	286,4917155
<b>PERDIDAS EN DEVANADO ESTATOR(W)</b>	131,3034246	168,9288442	221,5755083	294,4033239	498,5448937	625,0250015
<b>PERDIDAS EN DEVANADO ROTOR(W)</b>	5,890479044	21,52145032	46,68442337	83,47244754	183,6057087	250,1504181
<b>PERDIDAS RESIDUALES(W) CON VALOR ASUMIDO DISPERSA EN LA CARGA</b>	134,28	134,28	134,28	134,28	134,28	134,28
<b>EFICIENCIA(%)</b>	62,53346309	77,25563044	82,58408617	84,97561405	86,5292508	86,52559742

En las tablas 9, 10, 11, 12 se observa que las pérdidas por fricción y rozamiento con el aire y las pérdidas en el hierro, son constantes y no dependen de la carga que se esté aplicando al motor, sin embargo existe una diferencia entre el método B de la norma IEEE112 y el método 8.2.2.5.1 de la norma IEC60034-2-1 en el cálculo de las pérdidas en el hierro que se puede ver en la tabla 7.

Figura 14. Curvas de pérdidas residuales.

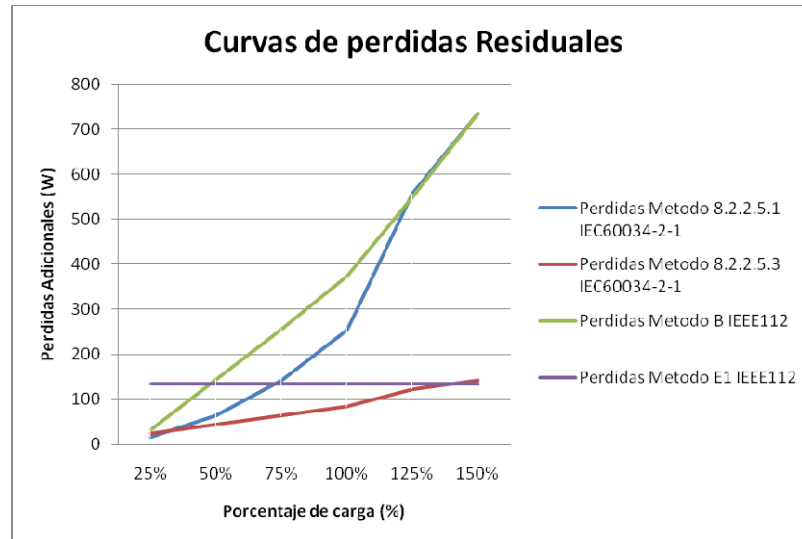
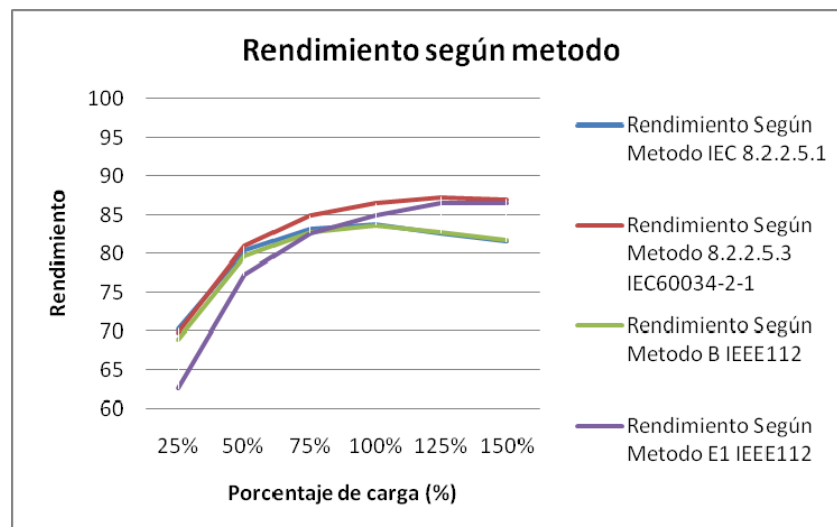


Figura 15. Rendimiento según método



En la figura 14 se realiza una comparación de las pérdidas adicionales calculadas por los cuatro métodos, donde podemos observar que existe una equivalencia entre los métodos B de la IEEE112 y 8.2.2.5.1 de la IEC60034-2-1

En la figura 15 se realiza una comparación de la eficiencia calculada por cada método, donde se observa también una mejor equivalencia entre los métodos B de la IEEE112 y 8.2.2.5.1 de la IEC60034-2-1.

En las figuras 16, 17, 18 y 19 se observa la distribución de pérdidas según cada método para un 100% de la carga nominal

Figura 16. Distribución de pérdidas método 8.2.2.5.1

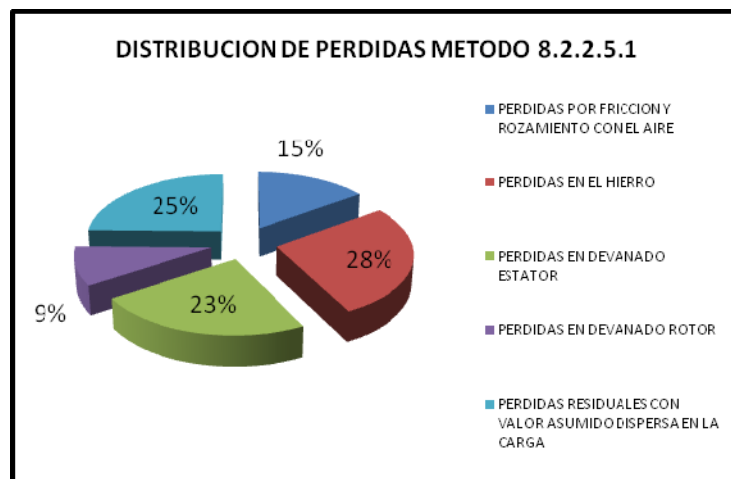


Figura 17. Distribución de pérdidas método 8.2.2.5.3

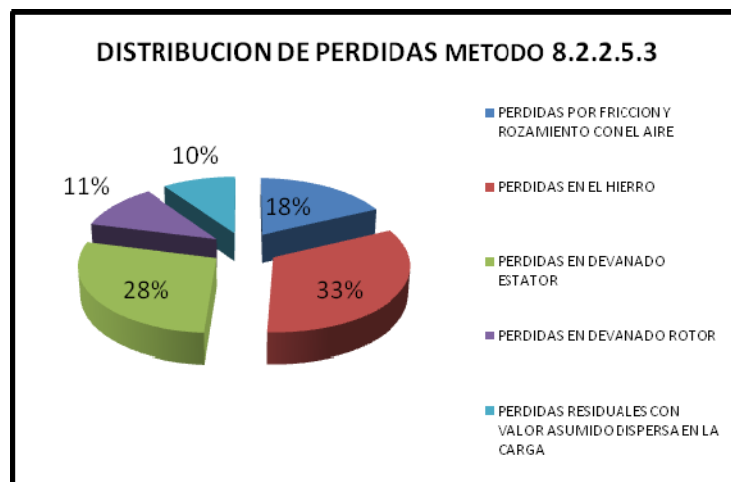


Figura 18. Distribución de pérdidas método E1

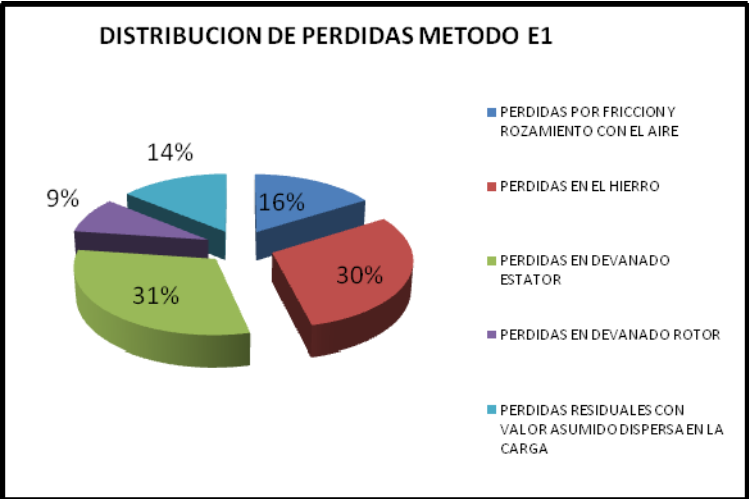
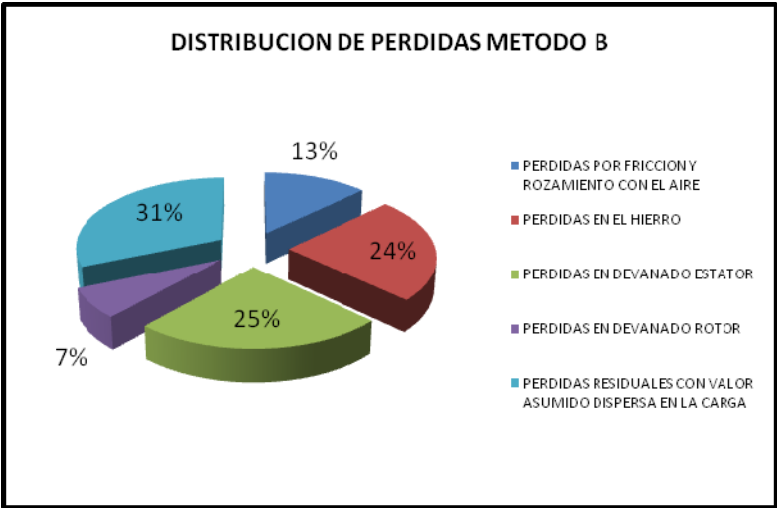


Figura 19. Distribución de pérdidas método B



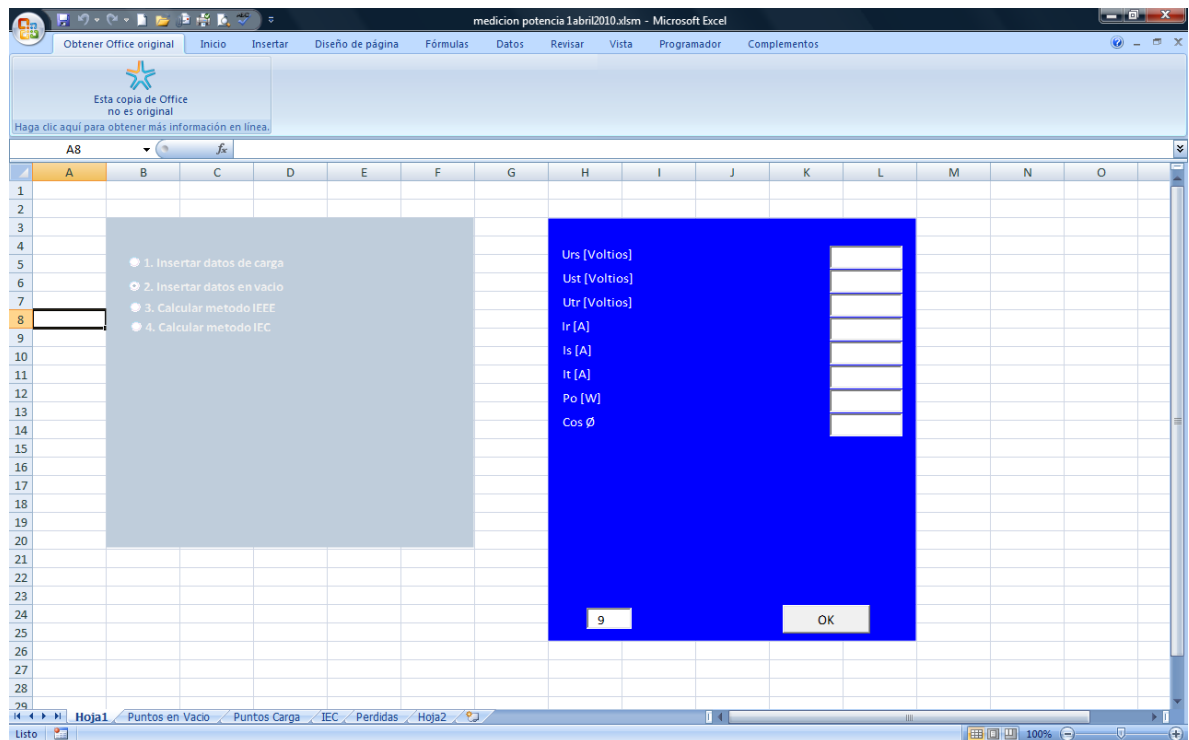
## 5. HERRAMIENTA DE EXCEL PARA CALCULAR LAS PERDIDAS Y LA EFICIENCIA EN MOTORES DE INDUCCIÓN

Este programa nos permite de una forma muy sencilla, calcular las pérdidas que se generan en un motor de inducción y la eficiencia para diferentes puntos de carga.

Ejecución del programa:

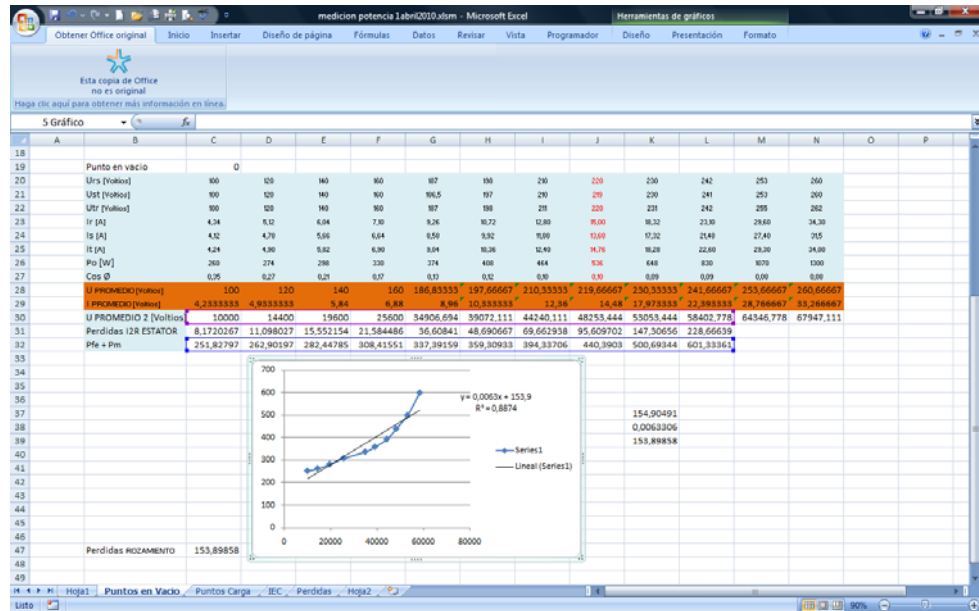
Abrimos el programa y nos mostrara la siguiente ventana, como se muestra en la figura 20.

Figura 20. Valor de voltaje y los datos de carga para cada punto de carga.



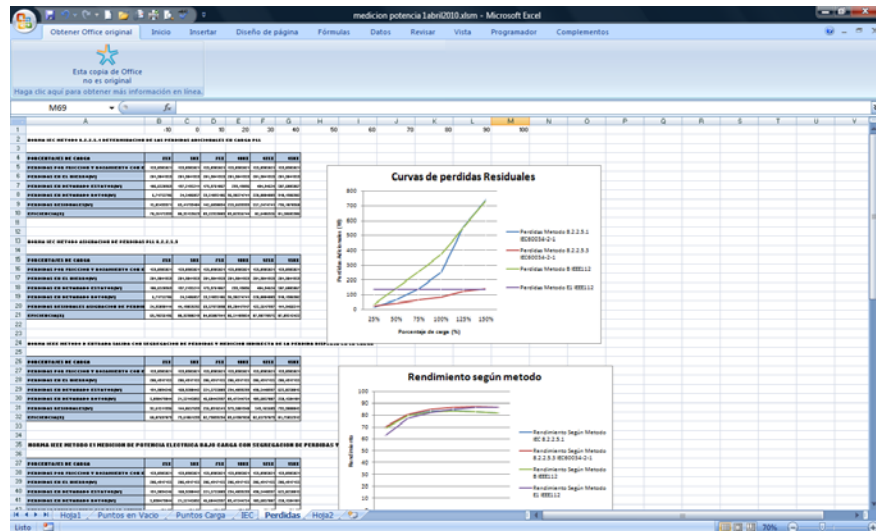
Aquí ingresamos los datos de vacio para cada valor de voltaje y los datos de carga para cada punto de carga.

Figura 21. Los datos de vacío



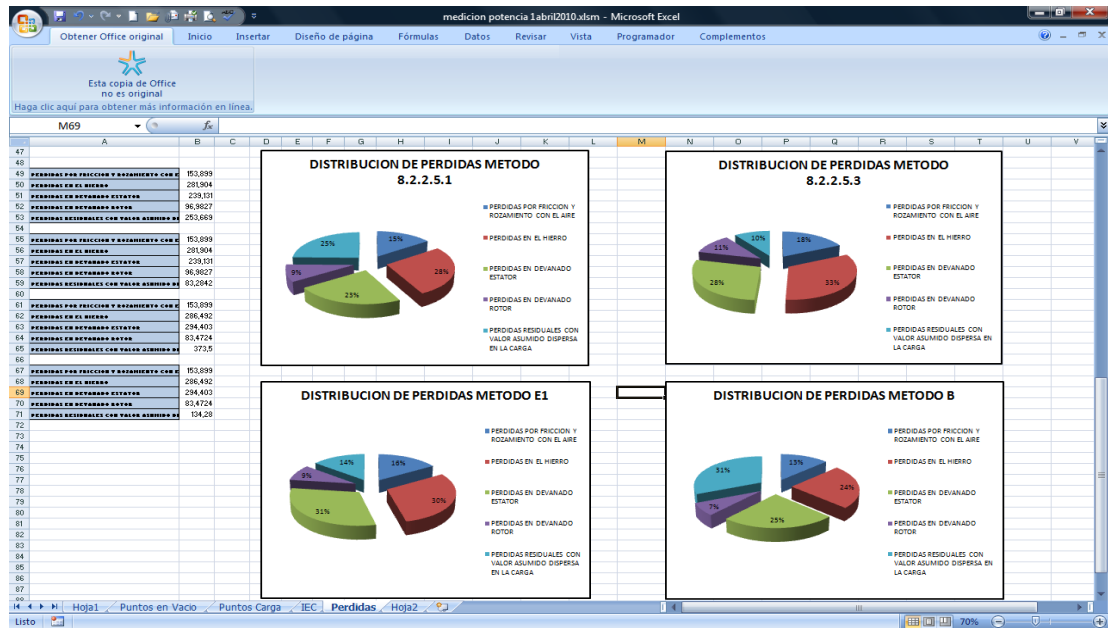
Después tenemos esta pantalla, figura 21, donde nos muestra los datos de vacío, se calculan pérdidas constantes y nos muestra la grafica de pérdidas por fricción y rozamiento con el aire.

Figura 22. Las pérdidas de acuerdo al método utilizado si es de la norma IEC60034-2-1 o de la IEEE112



Después tenemos en la figura 22, las pérdidas de acuerdo al método utilizado

Figura 23. Graficas de comparación de rendimiento según método y de distribución de pérdidas en un motor de inducción



Después tenemos un pantallazo, figura 23, donde nos aparecen las pérdidas de acuerdo al método utilizado si es de la norma IEC60034-2-1 o de la IEEE112 y las graficas de curvas de pérdidas y unas graficas de comparación de rendimiento según método y de distribución de perdidas en un motor de inducción.

## 6. INSTRUMENTACIÓN

Para realizar de una manera correcta los ensayos se deben tener en cuenta el rango de los instrumentos de medida seleccionados para un menor porcentaje de error en la medida, Ya que la exactitud del instrumento es expresada generalmente como un porcentaje de la escala total, el margen de alcance o intervalo de medición del instrumento escogido debe ser tan bajo como sea práctico.

Los instrumentos electrónicos por lo general son más versátiles y tienen impedancias de entrada mucho más altas que los instrumentos no electrónicos. Una impedancia de entrada más alta reduce la necesidad de hacer correcciones por la corriente demandada por el instrumento. Sin embargo, los instrumentos con una impedancia de entrada alta pueden ser más susceptibles al ruido.

Fuentes comunes de ruido son

- Acoplamiento inductivo o electrostático de los cables de señal a sistemas de potencia
- Acoplamiento de impedancia común o caminos cerrados a tierra
- Rechazo de modo común inadecuado
- Interferencia conducida desde la línea de potencia

De esta forma tenemos los siguientes puntos a considerar de acuerdo a cada norma, según la tabla 13.



**Tabla 13. Instrumentación**

<b>INSTRUMENTACIÓN</b>	<b>IEEE112</b>	<b>IEC60034-2-1</b>
<b>INTRUMENTACION</b>	Deben utilizarse instrumentación de alta exactitud, calibrada, y el equipo accesorio. Pueden utilizarse en la prueba instrumentos ya sean análogos o digitales.	El rango de los instrumentos seleccionados debe ser lo más pequeño que sea practico
<b>TRANSFORMADOR DE MEDIDA</b>	Los errores de los transformadores utilizados no deben ser mayores que $\pm 0.5\%$ para pruebas generales y no mayores que $\pm 0.3\%$ cuando los resultados de la prueba son para uso con el Método B de la Prueba de Eficiencia. Cuando los transformadores de medida y los instrumentos para la medición del voltaje, corriente, o potencia son calibrados como un sistema, los errores del sistema no deben ser mayores que $\pm 0.2\%$ de la escala total cuando los resultados de la prueba son para uso con el Método B de la Prueba de Eficiencia.	Los transformadores de medida deben tener una exactitud de tal manera que los errores no sean superiores a $\pm 0.5\%$ para ensayos generales o no superior a $\pm 0.3\%$ para maquinas de inducción método 8.2.2.5.1
<b>VOLTAJE</b>	Cada uno de los voltajes línea a línea debe ser medido con los cables de señal conectados a los terminales de la máquina. Si las condiciones locales no permitirán tales conexiones, la diferencia entre el voltaje en los terminales de la máquina y el punto de medición debe ser evaluada y las lecturas deben ser corregidas.	Los instrumentos de medición deben tener una clase de exactitud de 0,2
<b>CORRIENTE</b>	Las corrientes de línea para cada fase del motor deben ser medidas, y el valor del promedio aritmético debe ser utilizado en el cálculo del desempeño de la máquina a partir de los datos de la prueba.	Los instrumentos de medición deben tener una clase de exactitud de 0,2
<b>POTENCIA</b>	Los errores de la instrumentación utilizada para medir el par de torsión mecánico no deben ser mayores que $\pm 0.2\%$ de la escala total.	La instrumentación utilizada para medir el par debe tener una exactitud de $\pm 0.2\%$ de la escala total. Cuando el par del eje se mide por medio de un dinamómetro, se

Tabla 13. Continuación

<b>INSTRUMENTACIÓN</b>	<b>IEEE112</b>	<b>IEC60034-2-1</b>
<b>VELOCIDAD Y DESLIZAMIENTO</b>	Cuando se mide la velocidad, la instrumentación utilizada debe tener un error no mayor de $\pm 1.0$ r/m de la lectura.	La instrumentación para medir frecuencia debe tener una exactitud de $\pm 0.1\%$ de la escala total. La medición de la velocidad debería tener una exactitud en el rango de $\pm 0.1\%$ o 1 revolución por minuto.
<b>RESISTENCIA</b>	Los instrumentos deben llevar un registro de calibración, dentro de los 12 meses de la prueba, indicando límites de error no mayores de $\pm 0.2\%$ de plena escala.	
<b>TEMPERATURA</b>	La instrumentación para medir temperatura del devanado debe tener una exactitud de $\pm 1^\circ\text{C}$	La instrumentación para medir temperatura del devanado debe tener una exactitud de $\pm 1^\circ\text{C}$

En todos los ensayos donde sea necesario medir la resistencia del estator se debe proceder como sigue. Medir la resistencia entre los bornes de línea de conexión del motor y, según la conexión, la resistencia de fase será:

1. Conexión en estrella:

$$R_{\text{fase}} = 0,5 R_{\text{medida}}$$

2. Conexión en triángulo:

$$R_{\text{fase}} = 1,5 R_{\text{medida}}$$

## 7. CONCLUSIONES

Se realizó una comparación de normas para la determinación de la eficiencia en motores trifásicos de inducción publicadas por organizaciones como la IEEE, la IEC. A lo largo de los años, estas normas han sido modificadas y mejoradas para limitar su interpretación y obtener resultados exactos y repetibles de un lugar a otro.

En el análisis efectuado en este trabajo ha mostrado que ellas son muy similares si es usado el método de la sumatoria de pérdidas. Sin embargo también existen diferencias que tienen algunos impactos sobre la eficiencia resultante del motor. Con base en resultados obtenidos de pruebas, los impactos son insignificantes si el método es entendido correctamente por el usuario.

Existe una gran equivalencia entre el método B de la IEEE112 y el método 8.2.2.5.1 de la IEC60034-2-1, sin embargo existe una diferencia en el cálculo de las pérdidas en el núcleo y en la corrección de las pérdidas en el devanado del rotor y en el devanado del estator.

Existe una gran equivalencia entre el método E1 de la IEEE112 y el método 8.2.2.5.3 de la IEC60034-2-1, sin embargo el valor de las pérdidas adicionales para el método E1 son los mismos para cualquier punto de carga, generando así un porcentaje de error mayor que el método 8.2.2.5.3.

Las pérdidas generadas por el rozamiento y ventilación son constantes independiente del método utilizado y del porcentaje de carga del motor.

Las pérdidas en el hierro son constantes independiente del porcentaje de carga del motor, sin embargo existe una diferencia entre la norma IEEE112 y la IEC60034-2-1 ya que en la norma IEC toman en consideración la caída de tensión resistiva en el devanado primario, mientras que en la norma IEEE112 esta caída de tensión no se toma en cuenta.

La diferencia más significativa entre los métodos, la podemos observar en el valor de las pérdidas adicionales, ya que son determinadas en cada método de una forma diferente

En términos generales puede decirse que la IEC 60034 – 2 – 1 se ha alineado bien con la IEEE 12. Las dos normas presentan algunas diferencias en la

determinación de la pérdida en el conductor del estator, la pérdida en el núcleo y la pérdida adicional en la carga, pero no tienen diferencia en la determinación de la pérdida en el conductor del rotor, y las pérdidas por fricción y rozamiento con el aire. Las diferencias en las pérdidas en el conductor del estator nominales están virtualmente dentro de la tolerancia de la medición mientras que estas en la pérdida en núcleo y pérdida adicional en carga son relativamente significativas. Sin embargo, los valores de eficiencia nominal para las dos normas son aproximadamente iguales puesto que las pérdidas de potencia globales mediante los métodos estándar son muy similares.

La amplia utilización de los motores eléctricos en las aplicaciones industriales actuales justifica la importancia de considerar su rendimiento como uno de los elementos potencialmente importantes en programas de ahorro energético. La clasificación de los motores de inducción trifásicos según su rendimiento justifica la necesidad de su correcta determinación. A partir del análisis de diferentes métodos propuestos en las Normas queda de manifiesto que, según el método utilizado, los resultados obtenidos presentan diferencias significativas, debido principalmente a cómo se valoran las pérdidas adicionales en carga y al equipo de medida utilizado, siendo la medida del par la más delicada.

La determinación del rendimiento a partir de la separación de pérdidas que se obtiene con el ensayo en carga y medida del par es, actualmente, el que goza de mayor fiabilidad según la norma, especialmente para potencias medias y elevadas.

Para determinar la eficiencia en motores de inducción, la forma más exacta es utilizando los métodos donde se utiliza la medición de torque, con un torquímetro, pero si no tenemos esta herramienta podemos utilizar el método de asignación de pérdidas para determinar la eficiencia de una forma más rápida.

## BIBLIOGRAFÍA

ACOLTZI ACOITZI, Higinio. Revision de la normatividad en la aplicación de motores, de inducción, de eficiencia alta. En: Boletín IIE. Marzo – Abril, 2001. p. 79 – 86.

ALMEIDA\_A; FERREIRA, F; BUSCH, J. y ANGERS P. Comparative Analysis of IEEE 112B and IEC 34-2 Efficiency Testing Standards Using Stray Load Losses in Low-Voltage Three-Phase, Cage Induction Motors. En: IEEE Transactions on Industry Applications. Marzo – Abril, 2002, Vol. 38, no. 2. p. 608-614.

CASTRILLON MENDOZA, Rosaura del Pilar y QUISPE OQUENA, Enrique Ciro. Análisis comparativo de los métodos indirectos propuesto en las Normas IEC60034-2-1 y IEEE112 para determinar la eficiencia de motores de inducción En: III Congreso Internacional sobre Uso Racional y Eficiente de la Energía (27 -30 Noviembre, 2008: Medellín). Memorias III Congreso Internacional sobre Uso Racional y Eficiente de la Energía.

IEC Standard 60034-2-1, Rotating Electrical Machines. Part 2-1: Standard for determining losses and efficiency from tests excluding machines for traction vehicles. Switzerland: IEC, 2007. 80 p. IEC Standard 60034-2-1

IEEE. 112 - 2004 Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators [Base de Datos]. New York: IEEE, Power Engineering Society, 1984 [Consultado 20 de mayo de 2010]. Disponible en Internet:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=30683&isnumber=1303>

QUISPE OQUENA, Enrique Ciro y MANTILLA PENALBA, Luis Fernando. Motores eléctricos de alta eficiencia. Características electromecánicas, ventajas y aplicabilidad. En: Energía y Computación. Enero – Junio, 2004, Vol. 12, no. 1. p. 11-19